

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання комп'ютерних практикумів для студентів
освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напрямку підготовки
6.050702 “Електромеханіка”

*Рекомендовано Вченою Радою факультету
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”*

Київ
НТУУ «КПІ»
2016

УДК 681.3.06

Методичні вказівки до виконання комп'ютерних практикумів з дисципліни “Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка”/ Уклад.: Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін. – К.: НТУУ “КПІ”, 2016. – 84 с.

*Рекомендовано Вченою Радою факультету
електроенерготехніки та автоматики НТУУ “КПІ”
(Протокол №__ від __.__.____ р.)*

Навчальне видання

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання комп'ютерних практикумів для студентів
освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки
6.050702 “Електромеханіка”

Укладачі: *Васьковський Юрій Миколайович, докт. техн. наук, проф.
Гераскін Олександр Анатолійович, канд. техн. наук.*

Відповідальний
редактор *Гайденко Юрій Антонович, канд. техн. наук, доц.*

Рецензент *Островерхов М.Я., докт. техн. наук, проф.*

© НТУУ “КПІ”, 2016

© Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін, 2016

ЗМІСТ

Передмова	4
Комп'ютерний практикум №1. Математичне моделювання та дослідження впливу параметрів короткозамкненого асинхронного двигуна на пускові характеристики.....	5
Комп'ютерний практикум № 2 Математичне моделювання та дослідження пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметричній напрузі живлення в програмі MatLab – Simulink.....	13
Комп'ютерний практикум №3. Математичне моделювання та дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі при короткому замиканні	23
Комп'ютерний практикум №4. Математичне моделювання та дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі при протифазному вмиканні синхронного генератора в електромережу.....	31
Комп'ютерний практикум №5. Математичне моделювання електромагнітного поля силового трансформатора в програмі Comsol Multiphysics	35
Комп'ютерний практикум №6. Математичне моделювання електромагнітного поля короткозамкненого асинхронного двигуна в програмі Comsol Multiphysics	64
Перелік рекомендованої літератури	84
Додаток	85

ПЕРЕДМОВА

Представлені методичні вказівки призначені для використання студентами освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка” при проведенні комп’ютерних практикумів з дисципліни ***Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії***.

Виконання комп’ютерного практикуму дозволяє розвинути і закріпити у студентів навички досліджень складних динамічних процесів в електричних машинах на основі методів математичного моделювання з використанням сучасних програмних засобів. Зокрема головна увага приділяється математичному моделюванню перехідних процесів в найбільш поширених електричних машинах – асинхронних двигунах і синхронних генераторах. При моделюванні студенти використовують, як оригінальне програмне забезпечення, розроблене на кафедрі електромеханіки НТУУ “КПІ”, так і добре відомі програмно-обчислювальні комплекси MatLab – Simulink, Comsol Multiphysics.

Згідно з навчальними планами ОКР “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка” на комп’ютерний практикум з дисципліни “Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії” виділяється 18 годин аудиторних занять. Практикум складається з трьох окремих тематичних завдань. Тематика завдань по комп’ютерному практикуму та розподілення аудиторних годин є наступними:

1. Математичне моделювання та дослідження пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором - 2 комп’ютерних практикума (4 години).
2. Математичне моделювання та дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі - 2 комп’ютерних практикума (4 години).
3. Математичне моделювання електромагнітних полів в електромеханічних перетворювачах енергії в програмі Comsol Multiphysics - 4 комп’ютерних практикума (8 годин).
4. Захист отриманих студентом результатів комп’ютерних практикумів (2 години).

Результати математичного моделювання та дослідження впливу різних параметрів та факторів на пускові характеристики асинхронного двигуна (тематика комп’ютерного практикуму №1) узагальнюються студентами та оформлюються у вигляді розрахунково-графічної роботи.

При підготовці, виконанні та аналізі результатів комп’ютерних практикумів рекомендується використовувати навчальну літературу, список якої наведено в кінці даних методичних вказівок. Перелік інформації, що необхідно представити в протоколах, наведено в додатку.

ТЕМАТИЧНЕ ЗАВДАННЯ :
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКУ АСИНХРОННОГО
ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Комп'ютерний практикум №1

Математичне моделювання та дослідження впливу параметрів коротко-
замкненого асинхронного двигуна на пускові характеристики
(2 години)

Мета роботи. Дослідження впливу параметрів короткозамкненого асинхронного двигуна (АД) на величини ударного струму і ударного електромагнітного моменту при прямому пуску двигуна від електромережі.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Отримати варіант вхідних даних АД, що досліджується, та виконати моделювання його пуску по програмі EMSDU при зазначених номінальних даних.

2. Виконати серії розрахунків та дослідити величини ударного струму $I_{y\partial}^*$ і ударного моменту $M_{y\partial}^*$ при варіації наступних даних: $R_1, X_{1\sigma}, R_2, X_{2\sigma}, X_m, n_n, \varphi_0$.

3. Навести порівняння розподілів графіків $I_{y\partial}^*$ і $M_{y\partial}^*$ і швидкості ротора від часу для АД з номінальними параметрами в різних системах координат: $\alpha, \beta; u, v$.

4. Проаналізувати результати проведених досліджень.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Ударним струмом $I_{y\partial}^*$ називається максимальне (амплітудне) значення струму обмотки статора АД під час перехідного процесу (у даному випадку – пуску).

Ударним моментом $M_{y\partial}^*$ називається максимальне (амплітудне) значення електромагнітного моменту АД під час перехідного процесу (у даному випадку – пуску).

На рис.1 зображено розрахункові залежності струму, моменту і швидкості ротора від часу при пуску. Аналіз перехідного процесу проводиться в системі відносних одиниць, в якій всі величини позначені верхнім індексом (*).

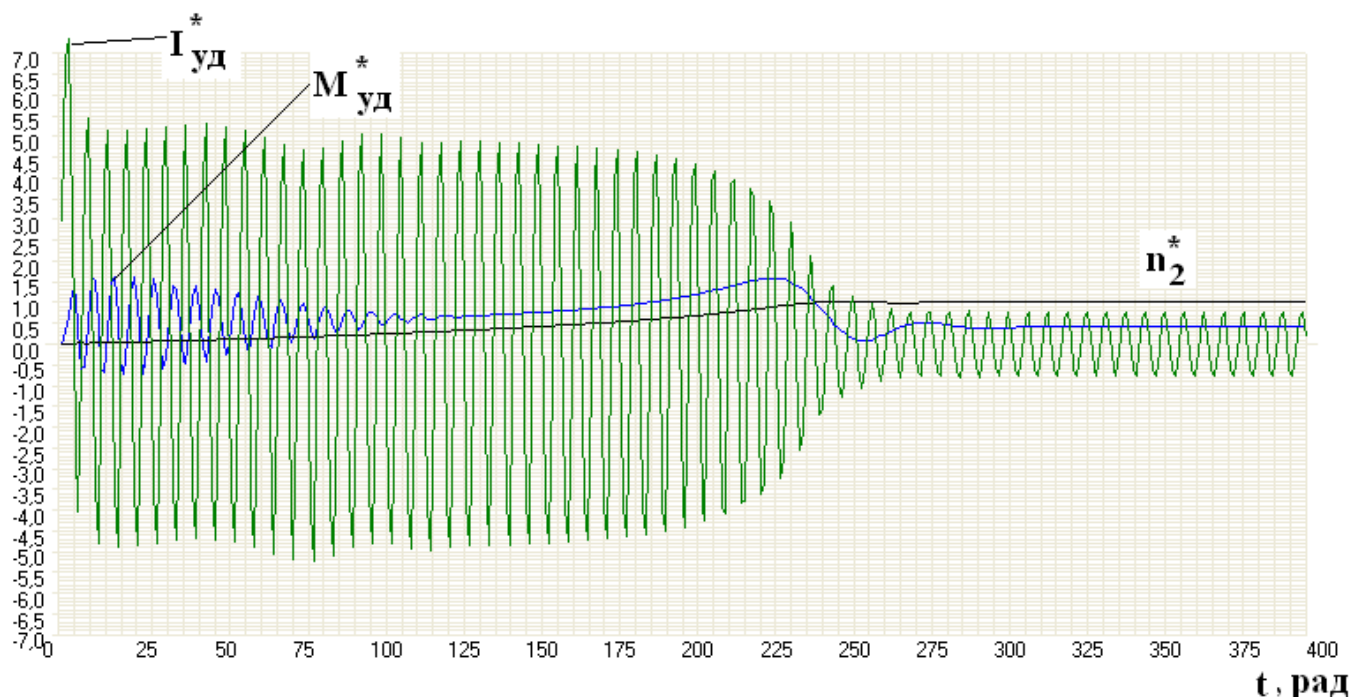


Рис.1 – Розрахункові залежності струму, електромагнітного моменту і швидкості ротора від часу

Час процесу вимірюється в радіанах. При цьому при частоті 50 Гц одна секунда часу відповідає 314,16 рад. Теоретичні відомості щодо пуску АД дано в літературі [1, 4, 6, 7].

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

При виконанні роботи використовується розроблена на кафедрі електромеханіки НТУУ “КПІ” комп'ютерна програма EMSDU, робоча панель якої зображена на рис.2. При розрахунку в програмі EMSDU необхідно 2-3 рази натискати «Расчет», оскільки 1-й і 2-й розрахунок можуть відрізнятися.

Всі розрахунки необхідно робити в координатах α , β . Максимальні значення $M_{уд}$ і $I_{уд}$ з таблиці розрахунків з програми EMSDU беруться по модулю, і ці значення можуть бути в різних рядках таблиці. Критерієм правильності графіків, що створює студент в Excel є рівномірність і плавність їх зміни.

Расчет пуска АД

Исходные данные по группам

1. Параметры двигателя

активное сопротивление статора (r)	0,035
индукт. сопр. рассеивания статора (X_s)	0,071
активное сопротивление ротора (R_f)	0,02
инд. сопр. рассеив. ротора (X_{sf})	0,12
инд. сопротивление взаимоиндукции (X_m)	2
инерционная постоянная агрегата (H_j)	157
начальная фаза напряжения сети (φ_0)	0

2. Параметры внешних воздействий

T1(начало действия возмущения)	250
T2(конец действия возмущения)	300
момент сопротивления	0,15

3. Параметры расчетного процесса

Система координат

☐ Координаты U,V

☒ Координаты A,B

P_i	3,141594
T_{max}	400

4. Параметры организации вывода

имя очередного файла результатов

AD-REZ1.DAT

Вертикальный размер графика

7

5. Паспорт машины

P_n	9	КВт
U_n	380	В
n	950	об/мин

Начальная скорость

0

$h = 2 * \pi /$

6 шаг расчета

10 шаг печати

Графики

- ☒ Электромагнитный момент
- ☒ Скорость вращ. ротора
- ☒ Напряжение сети
- ☒ Ток статора

Распечатать график

РАСЧЕТ

ВЫХОД

Рис.2 – Программа “EMSDU”

Структура вхідних даних в програмі EMSDU є наступною.

1. Блок даних щодо параметрів АД:

- активний опір обмотки статора R_1^* , в.о.
- індуктивний опір розсіювання обмотки статора $X_{1\sigma}^*$, в.о.;
- активний опір обмотки ротора (приведений) R_2^* , в.о.;
- індуктивний опір розсіювання обмотки ротора (приведений) $X_{2\sigma}^*$, в.о.;
- індуктивний опір взаємоіндукції X_m^* , в.о.;
- інерційна стала агрегату H_j (в програмі “EMSDU” значення вводиться в мілісекундах);
- початкова фаза напруги мережі живлення φ_0 , рад.

2. Блок даних зовнішнього збурення:

- початок дії збурення T_1 , рад;
- кінець дії збурення T_2 , рад;
- зовнішній момент опору M_c , Н·м.

3. Блок даних з параметрами розрахункового процесу:

- вибір системи координат, в якій розглядається перехідний процес. Для аналізу пуску АД рекомендується обрати статорну систему координат А, В;
- інтервал часу, в якому розглядається процес T_{\max} . Для аналізу процесу пуску без проміжних зовнішніх збурень необхідно задати $T_1 > T_{\max}$.

4. Параметри організації виводу розрахункової інформації:

- задається ім'я файлу, в який буде записуватися інформація.

5. Паспортні дані машини і початкова швидкість:

- номінальна потужність, напруга (лінійна) і швидкість;
- початкова швидкість ротора.

6. Чисельні параметри розрахункового процесу:

- крок розрахунку у часі;
- крок виводу інформації на друк.

Зауваження: Окрім процесу пуску АД програма EMSDU дозволяє змодельовати комбінований процес, який складається з трьох етапів: вмикання АД в мережу і початок процесу його пуску; відмикання двигуна від мережі в момент часу T_1 ; повторне вмикання АД в мережу в момент часу T_2 . У разі, якщо на інтервалі часу T_{\max} потрібно змодельовати тільки процес пуску в програмі задається $T_1 > T_{\max}$.

Програма EMSDU реалізує математичну модель АД, яка ґрунтується на Т – подібній схемі замикання АД [1, 4, 10]. Для чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь використовується метод Рунге-Кутта 4-го порядку з постійним кроком інтегрування.

Перелік інформації, яку необхідно представити в протоколі до **Комп'ютерного практикуму №1** наведено в Додатку.

Особливості процесу виконання комп'ютерного практикуму:

1. Отримати варіант вхідних даних АД, що досліджується, та виконати моделювання його пуску по програмі EMSDU при зазначених номінальних даних:

- Зовнішній момент опору M_c прийняти згідно варіанту і залишати незмінним при наступних дослідженнях.
- Величину інерційної сталої агрегату H_j прийняти згідно варіанту і залишати незмінною при наступних дослідженнях.
- При моделюванні для всіх варіантів прийняти номінальну напругу обмотки статора згідно варіанту.
- Роздрукувати отримані розрахункові осцилограми пуску АД для їх включення в звіт (рис.1).

2. Виконати серії розрахунків та дослідити величини ударного струму $I_{y\delta}^*$ і ударного моменту $M_{y\delta}^*$ при варіації наступних даних:

- величини активного опору обмотки статора (від $0,2 \cdot R_1$ до $3 \cdot R_1$), наприклад, $(0,2; 0,5; 0,8; 1,1; 1,4; 1,7; 2,0; 2,3; 2,6; 3) \cdot R_1$;
- величини індуктивного опору обмотки статора (від $0,2 \cdot X_{1\sigma}$ до $3 \cdot X_{1\sigma}$);
- величини активного опору обмотки ротора (від $0,2 \cdot R_2$ до $3 \cdot R_2$);
- величини індуктивного опору обмотки ротора (від $0,2 \cdot X_{2\sigma}$ до $3 \cdot X_{2\sigma}$);
- величини індуктивного опору взаємодукції (від $0,2 \cdot X_m$ до $3 \cdot X_m$);
- величини початкової швидкості обертання ротора (від $-2,5 \cdot n_n$ до $2,5 \cdot n_n$);
- величини початкової фази напруги мережі φ_0 (від $-3,14$ рад до $+3,14$ рад).

Варіації параметрів АД виконуються наступним чином. Варіюється перший із зазначених параметрів, наприклад, активний опір обмотки статора, при незмінних інших, які дорівнюють номінальним значенням. В другій серії розрахунків першому і всім іншим параметрам (окрім другого) присвоюються номінальні значення, а варіюється другий параметр і т. д. При варіації кожного з параметрів виконується 8 ... 10 розрахунків процесу пуску.

За допомогою програми Excel побудувати попарно на одному рисунку графічні залежності величин ударного струму $I_{y\delta}^*$ і ударного моменту $M_{y\delta}^*$ від параметру, значення якого варіювалося (всього будується 7 графіків). Навести таблиці, на основі яких ці графіки побудовані. Особливу увагу приділити дослідженню залежностей $I_{y\delta}^*$ і $M_{y\delta}^*$ від активного опору обмотки ротора і від початкової швидкості АД, які мають суттєві особливості. Зокрема, діапазон початкових швидкостей повинен перевищувати задану синхронну швидкість двигуна.

Наприклад, таблиця і графіки можуть бути такими:

r_1	0,0006	0,006	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18
M_c	5,53	5,3	4	3	2,4	1,88	1,5	1,1
I	6,82	6,5	5,9	5,2	4,6	4,18	3,7	3,4

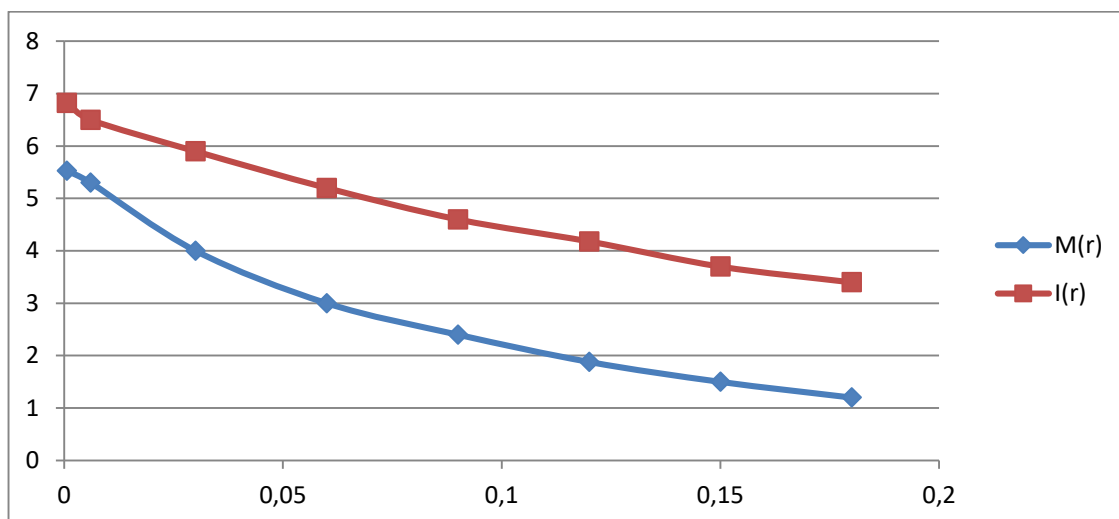


Рис.3 – Приклад графіку

3. Навести порівняння розподілів графіків $I_{y\partial}^*$ і $M_{y\partial}^*$ і швидкості ротора від часу для АД з номінальними параметрами в різних системах координат: α , β ; u , v .

4. Проаналізувати результати проведених досліджень і зробити висновки щодо впливу зазначених параметрів на пускові характеристики АД. У висновках по роботі необхідно охарактеризувати отримані результати кількісно і співставити їх з відомими фізичними процесами в асинхронних двигунах.

Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №1. В таблиці 1 наведено дані варіантів АД, що досліджуються.

Таблиця 1 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №1

№ варіанту	Параметри асинхронного двигуна						
	P_2 , кВт	n_1 , об/хв	$X_{1\sigma}$, в.о.	$X_{2\sigma}$, в.о.	R_1 , в.о.	R_2 , в.о.	X_m , в.о.
1	3,5	3000	0,0635	0,0584	0,0722	0,0317	2,7
2	5	1500	0,1	0,08	0,055	0,05	2,5
3	1,5	750	0,0866	0,132	0,1321	0,0892	1,7
4	1,1	3000	0,0831	0,0512	0,1058	0,0457	1,5
5	2,2	3000	0,0866	0,08	0,0731	0,0367	3
6	75	1500	0,1	0,12	0,0178	0,0143	4
7	3,5	1000	0,08	0,06	0,056	0,06	2,5
8	5	1000	0,12	0,09	0,075	0,07	2
9	6	750	0,15	0,13	0,09	0,08	1,7
10	2	1500	0,1	0,12	0,05	0,06	2,3
11	4	3000	0,09	0,08	0,0731	0,0367	3
12	35	750	0,15	0,1	0,05	0,05	3
13	25	3000	0,09	0,09	0,02	0,01	3
14	10	1000	0,11	0,08	0,03	0,02	2,5
15	5	3000	0,08	0,1	0,045	0,06	3
16	6	750	0,15	0,13	0,06	0,05	1,9
17	2	1500	0,1	0,12	0,05	0,06	2
18	15	3000	0,09	0,08	0,0731	0,0367	3
19	35	750	0,15	0,1	0,05	0,05	3
20	3,5	1000	0,15	0,08	0,05	0,01	2,5
21	5	1000	0,1	0,1	0,02	0,02	3
22	6	750	0,09	0,09	0,03	0,06	1,9
23	2	1500	0,15	0,08	0,045	0,05	2
24	4	3000	0,09	0,1	0,06	0,06	3
25	35	750	0,11	0,13	0,05	0,0367	3
26	6	500	0,15	0,13	0,06	0,05	1,9
27	25	600	0,09	0,09	0,02	0,01	3
28	15	600	0,09	0,08	0,0731	0,0367	3
29	2,2	600	0,0866	0,08	0,0731	0,0367	3
30	35	500	0,15	0,1	0,05	0,05	3

Продовження таблиці 1

№ варіанту	Параметри асинхронного двигуна					
	H_j , мс	φ_0 , рад	T_1 , рад	T_2 , рад	M_c , Н·м	$U_{лн}$, В
1	157	0,524	250	300	0,15	220
2	225	1,047	100	125	0,2	380
3	187	0,785	150	200	0,1	220
4	325	1,571	125	200	0,15	220
5	126	3,142	200	225	0,25	220
6	225	4,712	175	225	0,15	660
7	187	2,356	100	175	0,2	220
8	325	5,236	150	175	0,1	380
9	126	1,047	125	175	0,15	380
10	225	0,785	100	175	0,25	220
11	187	1,571	150	175	0,15	220
12	325	3,142	125	175	0,2	660
13	126	4,712	200	275	0,1	660
14	225	2,356	100	125	0,15	380
15	187	5,236	150	200	0,25	380
16	325	1,047	125	200	0,15	380
17	126	0,785	200	225	0,2	220
18	225	1,571	100	150	0,1	660
19	187	3,142	150	225	0,15	660
20	325	1,047	125	150	0,25	220
21	126	0,785	200	250	0,15	380
22	225	1,571	100	175	0,2	380
23	187	3,142	150	175	0,1	220
24	325	4,712	125	175	0,15	220
25	126	2,356	200	275	0,25	660
26	325	1,047	125	200	0,15	220
27	126	4,712	200	275	0,1	660
28	225	1,571	100	150	0,1	380
29	126	3,142	200	225	0,25	220
30	325	3,142	125	175	0,2	660

Комп'ютерний практикум № 2

Математичне моделювання та дослідження пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметричній напрузі живлення в програмі Matlab – Simulink (2 години)

Мета роботи. Дослідження впливу несиметрії напруги живлення на пускові характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в програмі MatLab – Simulink.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Побудувати структурну схему асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в пакеті MatLab – Simulink.

2. Обрати варіант АД (дані варіанту такі ж, як і в комп'ютерному практикумі №1 – таблиця 1).

3. Промоделювати процес пуску асинхронного двигуна с заданими параметрами при симетричній напрузі живлення. Побудувати розрахункові осцилограми (в інтервалі часу 0 ... 5 с) наступних величин:

- струмів фаз обмотки статора I_1 ;
- струмів фаз обмотки ротора I_2 ;
- електромагнітний момент M ;
- швидкість обертання ротора n ;
- напруга мережі U .

Зазначені осцилограми використати в звіті по роботі.

4. Провести серію розрахунків (8 ... 10 розрахунків) при амплітудній несиметрії напруги живлення шляхом зміни напруги живлення фази В. В кожному розрахунку визначити величини ударного струму $I_{y\partial}^*$, ударного моменту $M_{y\partial}^*$, а також час розгону двигуна t_P до номінальної швидкості. Побудувати графіки зміни $I_{y\partial}^*$, $M_{y\partial}^*$ і t_P від коефіцієнту амплітудної несиметрії k_A .

5. Провести серію розрахунків (8 ... 10 розрахунків) при фазовій несиметрії напруги живлення шляхом зміни кута напруги живлення фази В. В кожному розрахунку визначити величини ударного струму $I_{y\partial}^*$, ударного моменту $M_{y\partial}^*$, а також час розгону двигуна t_P до номінальної швидкості. Побудувати графіки зміни $I_{y\partial}^*$, $M_{y\partial}^*$ і t_P від коефіцієнту фазової несиметрії k_ϕ .

6. Провести серію розрахунків (8 ... 10 розрахунків) при змішаній несиметрії напруги живлення шляхом одночасної зміни амплітуди і фазового кута напруги живлення фази В. В кожному розрахунку визначити величини ударного струму $I_{y\partial}^*$, ударного моменту $M_{y\partial}^*$, а також час розгону двигуна t_P до номінальної швидкості. Побудувати графіки зміни $I_{y\partial}^*$, $M_{y\partial}^*$ і t_P від коефіцієнту змішаної несиметрії k_3 .

7. Провести порівняльний аналіз впливу різних видів несиметрії на пускові характеристики двигуна. Написати висновки по роботі.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Пускові характеристики короткозамкненого АД погіршуються у разі несиметрії трифазної напруги, що живить АД. Зокрема збільшується час пуску, спотворюються струми в фазах тощо. Можливі наступні випадки несиметрії прикладеної напруги: 1) *амплітудна несиметрія*, при якій амплітуди напруг різних фаз є неоднаковими по величині; 2) *фазова несиметрія*, при якій фазові кути між напругами різних фаз є неоднаковими; 3) *змішана несиметрія*, при якій присутнє сполучення двох попередніх випадків.

Аналіз впливу амплітудної несиметрії проводиться при умові незмінності напруг в двох фазах обмотки статора АД (наприклад, фаз А і С) і зміні напруги в фазі В від 0 до номінального значення (5-7 точок). При цьому вводиться коефіцієнт амплітудної несиметрії

$$k_A = \frac{U_A - U_B}{U_A}.$$

Значення цього коефіцієнту знаходиться в межах $0 \leq k_A \leq 1$. При відсутності несиметрії ($U_A = U_B$) маємо $k_A = 0$, а при максимальній несиметрії (напруга в одній фазі $U_B = 0$) коефіцієнт амплітудної несиметрії $k_A = 1$.

Задавати кути фазових зсувів струмів в АД можна, наприклад, так: $\varphi_A = 0, \varphi_B = 120^\circ, \varphi_C = 240^\circ$, або $\varphi_A = -120^\circ, \varphi_B = 0, \varphi_C = 120^\circ$.

Необхідно врахувати початкову фазу ЕРС в АД, наприклад, так:

$$E_A = A \cdot \sin\left(\frac{\varphi_0}{\pi} \cdot 180 + \varphi_A\right), \text{ де } \varphi_0 - \text{значення з табл. 1.}$$

Аналіз впливу фазної несиметрії проводиться при умові незмінності кутів напруг в двох фазах обмотки статора АД (наприклад, фаз А і С: $\varphi_A = 0, \varphi_C = 240^\circ$) і зміні кута напруги в фазі В в межах $0^\circ \leq \varphi_B \leq 240^\circ$ (5-7 точок). При цьому вводиться коефіцієнт фазової несиметрії

$$k_\varphi = \frac{\varphi_B - 120^\circ}{120^\circ}.$$

Значення цього коефіцієнту знаходиться в межах $-1 \leq k_\phi \leq 1$. При відсутності фазової несиметрії ($\varphi_B = 120^\circ$) маємо $k_\phi = 0$, а при максимальній несиметрії (напруги фаз В і С мають однаковий кут $\varphi_B = 240^\circ$) коефіцієнт дорівнює $k_\phi = 1$.

Для аналізу змішаної несиметрії використовується коефіцієнт

$$k_3 = k_A + k_\phi$$

Числові значення коефіцієнту змішаної несиметрії лежать в межах $-1 \leq k_3 \leq 2$. Однак при умові, що коефіцієнти мають бути однаковими $k_A = k_\phi$, межі коефіцієнту змішаної несиметрії будуть $0 \leq k_3 \leq 2$.

Аналіз впливу несиметрії напруги живлення на пускові характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором проводиться за допомогою математичної моделі, розробленої в пакеті MatLab – Simulink.

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

1. Завантажити на комп'ютері систему MatLab.
2. Увійти в підсистему моделювання динамічних процесів Simulink. Після запуску Simulink відкриється вікно для побудови нової моделі (рис.4).

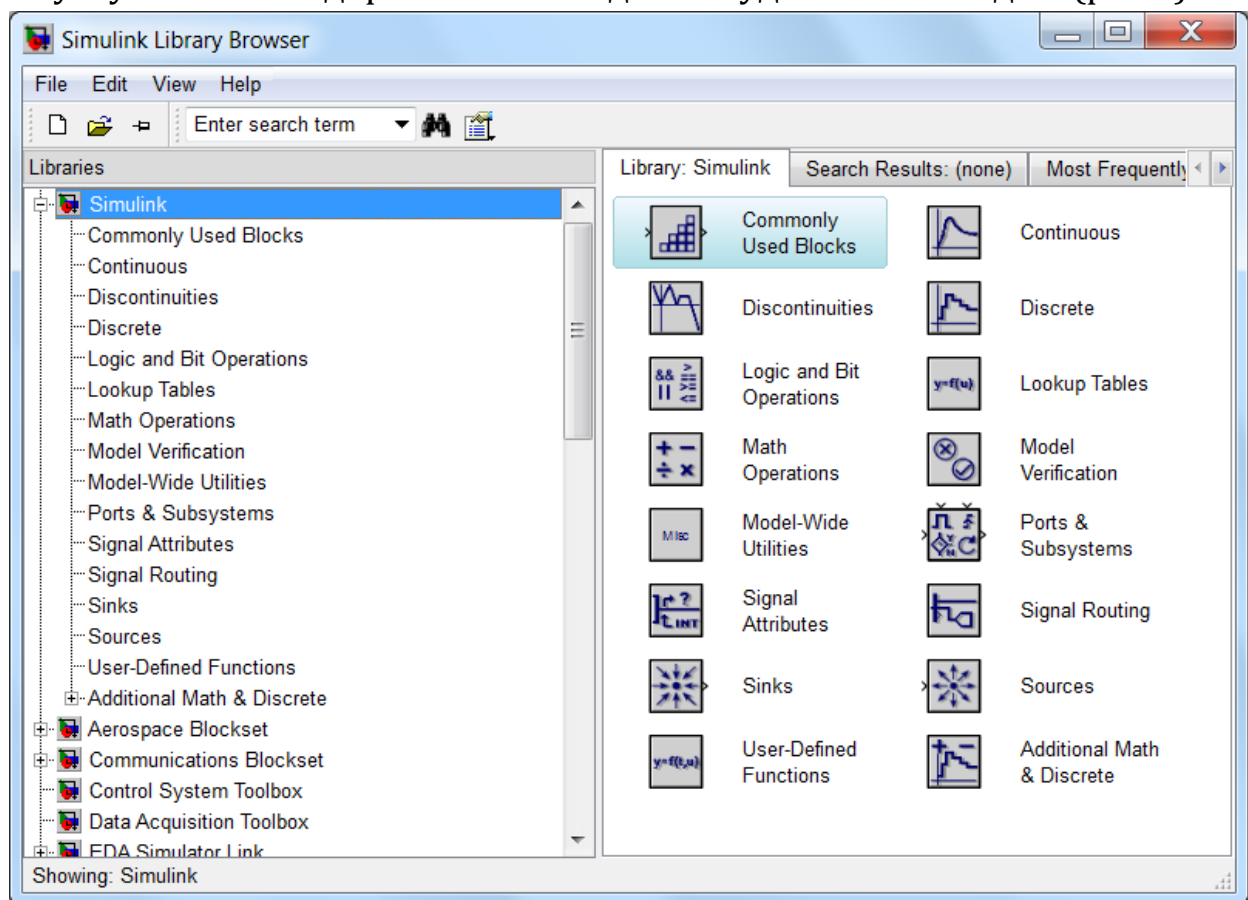
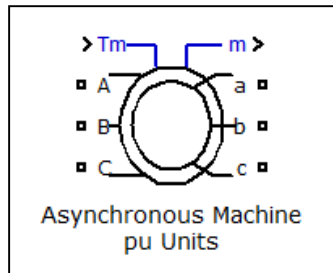


Рис.4 – Бібліотека Simulink

3. Побудувати структурну схему моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в програмі Simulink (рис.4). Схема будується в наступній послідовності:

a) У вікні **Libraries** вибрати шлях **SimPowerSystems→Machines→Asynchronous Machines pu Units** для побудови моделі асинхронної машини у відносних одиницях. Натиснути правою кнопкою

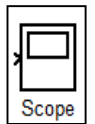


мишки та вибрати **Add to a new model**. В результаті цього відкриється вікно для побудови нової моделі в Simulink із вставленим елементом.

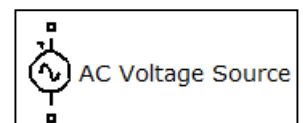
b) Вибрати шлях **SimPowerSystems→Machines→ Machines Measurement Demux** для вставлення в структурну схему блоку вимірювань. Натиснути правою кнопкою мишки та вибрати **Add to untitled**. Новий елемент по замовчуванню буде розміщений в те ж саме місце, що і перший елемент. Їх необхідно розсунути по робочому простору для того, щоб вони не накладалися один на одного.



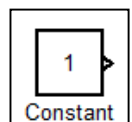
c) У вікні **Libraries** вибрати шлях **Simulink→Sinks→Scope** і додати п'ять осцилографів для вимірювання величин струмів статора і ротора, швидкості ротора, електромагнітного моменту та напруги живлення.



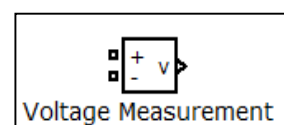
d) Вибрати шлях **SimPowerSystems→Electrical Sources→ AC Voltage Source** і додати три елемента, що моделюють джерела змінної напруги живлення для кожної з фаз обмотки статора АД.



e) У вікні **Libraries** обрати шлях **Simulink→Sources→Constant**, вибрати і додати один елемент, що задає константи і використовується для задання зовнішнього моменту навантаження на валу АД.



f) Вибрати шлях **Libraries SimPowerSystems→ Measurements→ Voltage Measurement**, вибрати



та

додати елемент, призначений для вимірювання напруги.

- g) З'єднати між собою елементи так, як показано на структурній схемі моделі пуску АД на рис.5.

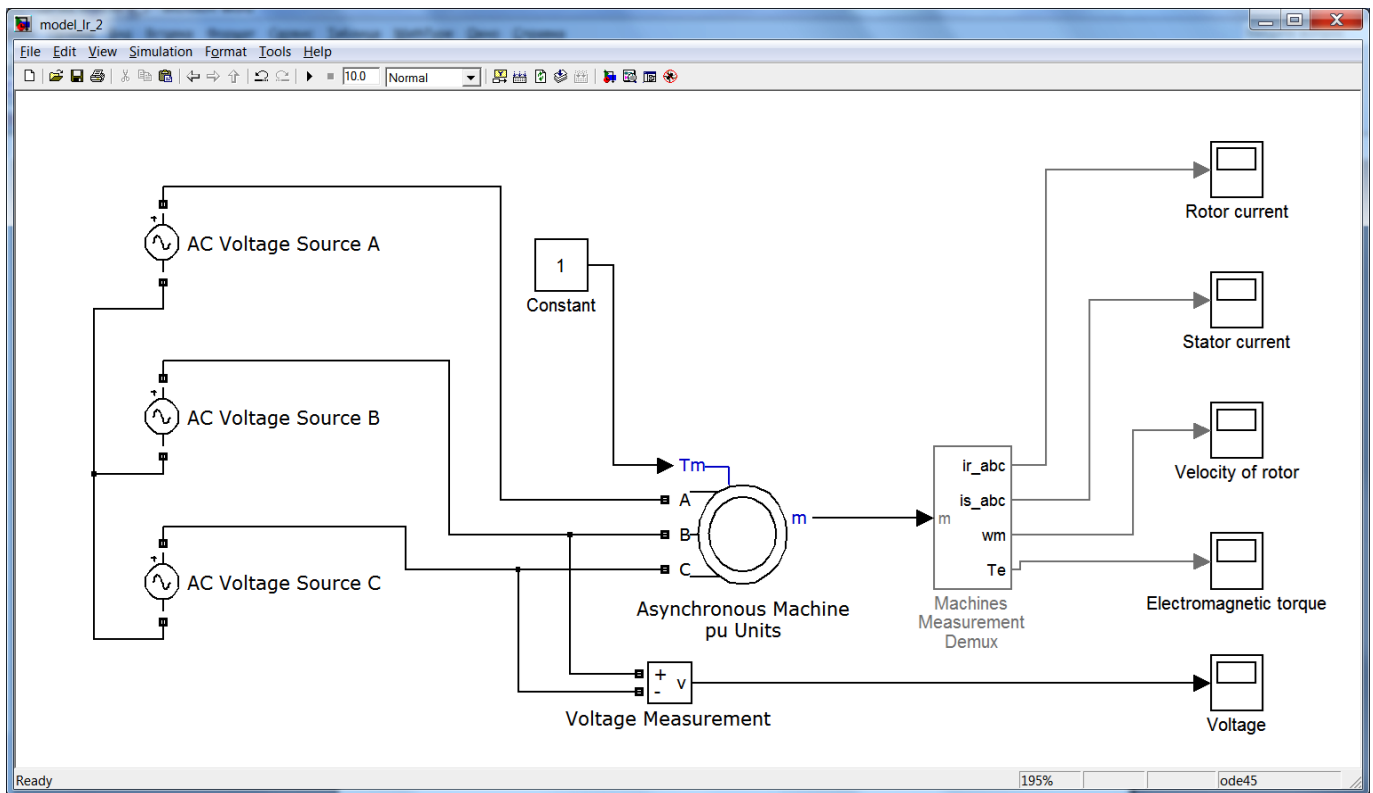
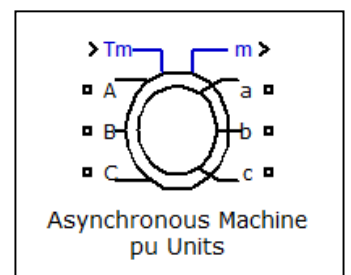


Рис.5 – Структурна схема моделі пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в Matlab 2009

4. Задати параметри елементів схеми, зокрема, параметри асинхронного двигуна, що буде досліджуватися, згідно варіанту завдання з таблиці 1.

- а) Параметри АД задаються наступним чином. Двічі натисніть лівою кнопкою миші на елемент схеми **Asynchronous Machines pu Units** і відкриється вікно його властивостей (рис. 6). В рядку **Rotor type** необхідно вибрати конструкцію машини з короткозамкненою обмоткою ротора **Squirrel-cage** і натиснути **Apply**. Перейшовши до закладки **Parameters**, необхідно ввести дані асинхронного двигуна згідно з варіантом завдання. Слід зазначити, що повна потужність задається у ВА, а лінійна напруга задається у вольтах. Всі величини опорів задаються у відносних одиницях. Також необхідно задати інерційну сталу **H**, коефіцієнт тертя ("friction factor"), та число пар полюсів. Натиснути **Apply**.



В програмі **Pn** [В·А] мається на увазі **Sn** [В·А]. Для визначення **Sn** необхідно застосувати формулу: **Sn= Pn(з варіанту)/cosφ**. Для всіх варіантів необхідно задавати cosφ=0,8.

В програмі **Friction factor** [в.о.] для всіх варіантів необхідно задавати F=0,05497.

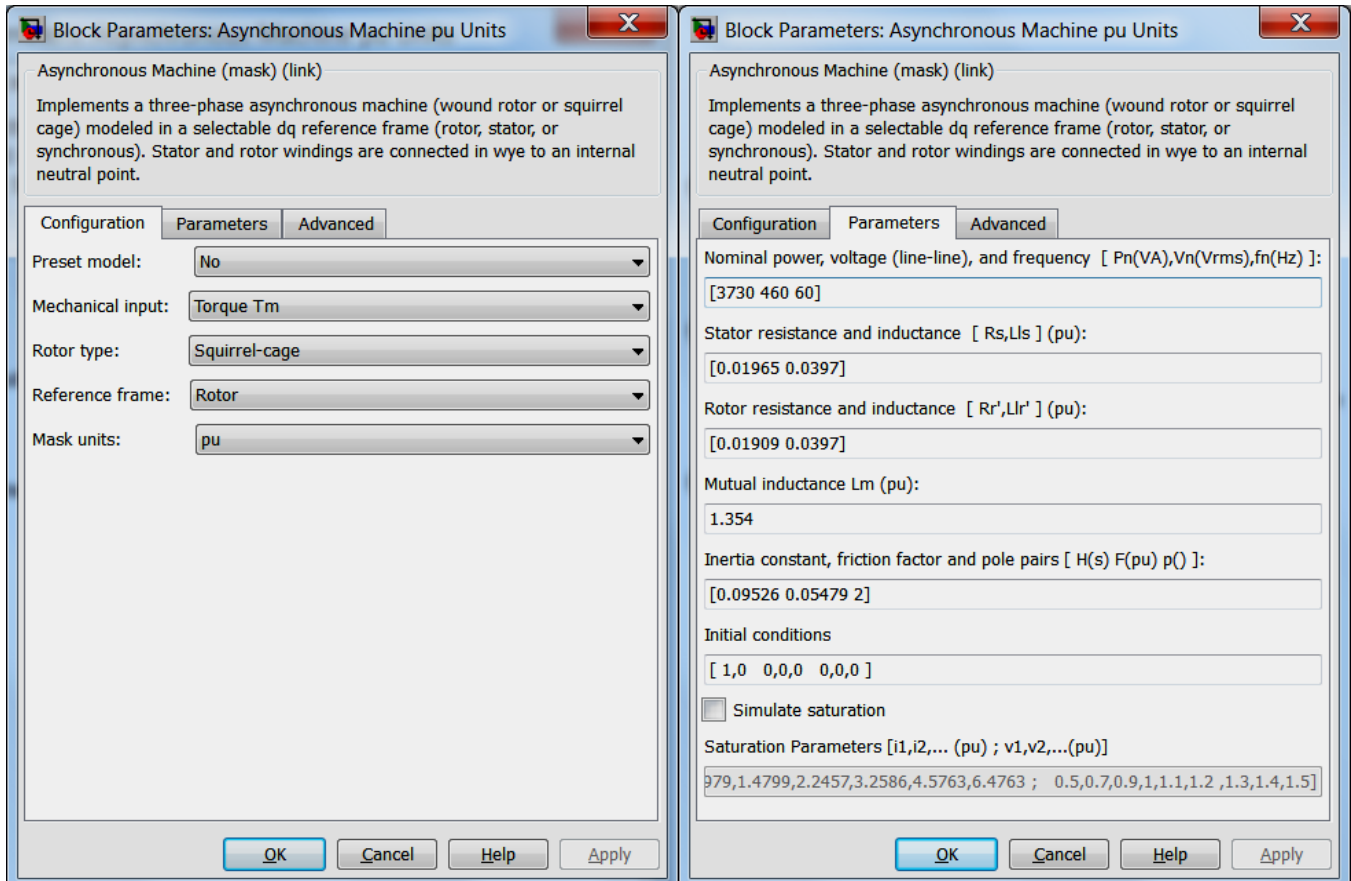


Рис.6 – Параметри асинхронного двигуна

б) В елементі **Machines Measurement Demux** помітками необхідно виставити наступні дані (рис.7 а):

- тип машини – асинхронна;
- струми ротора;
- струми статора;
- швидкість ротора;
- електромагнітний момент.

Додаткова інформація:

1) Вищенаведені схема і алгоритм побудови схеми виконувались в Matlab 2009. Для більш сучасних версій програми, наприклад, Matlab 2015 можна побудувати схему, зображену на Рис.8. Замість об'єкта **Machines Measurement Demux** необхідно використати **Bus Selector** з параметрами, зображеними на Рис.9.

2) Спочатку необхідно зібрати схему **AC voltage → Asynchronous Machine** і т.д. й з'єднати елементи схеми, а тільки потім можна буде вибирати параметри в **Bus Selector** (в Matlab 2015).

Також в для спрощення процесу отримання параметрів можна додати **MinMax, Memory** (рис.8)

с) В елементах **AC Voltage Source** необхідно задати частоту мережі (50 Гц) і лінійні номінальні значення напруги живлення асинхронного двигуна для кожної з фаз статора, причому в кожному з джерел напруги фаз А, В, С необхідно задати відповідний фазовий зсув: відповідно 0, 120 і 240 град. (рис.7 б). У подальшому при моделюванні несиметрії напруги живлення АД амплітуди і фазові зсуви напруги фази В будуть змінюватися у відповідності до виду несиметрії, що розглядається.

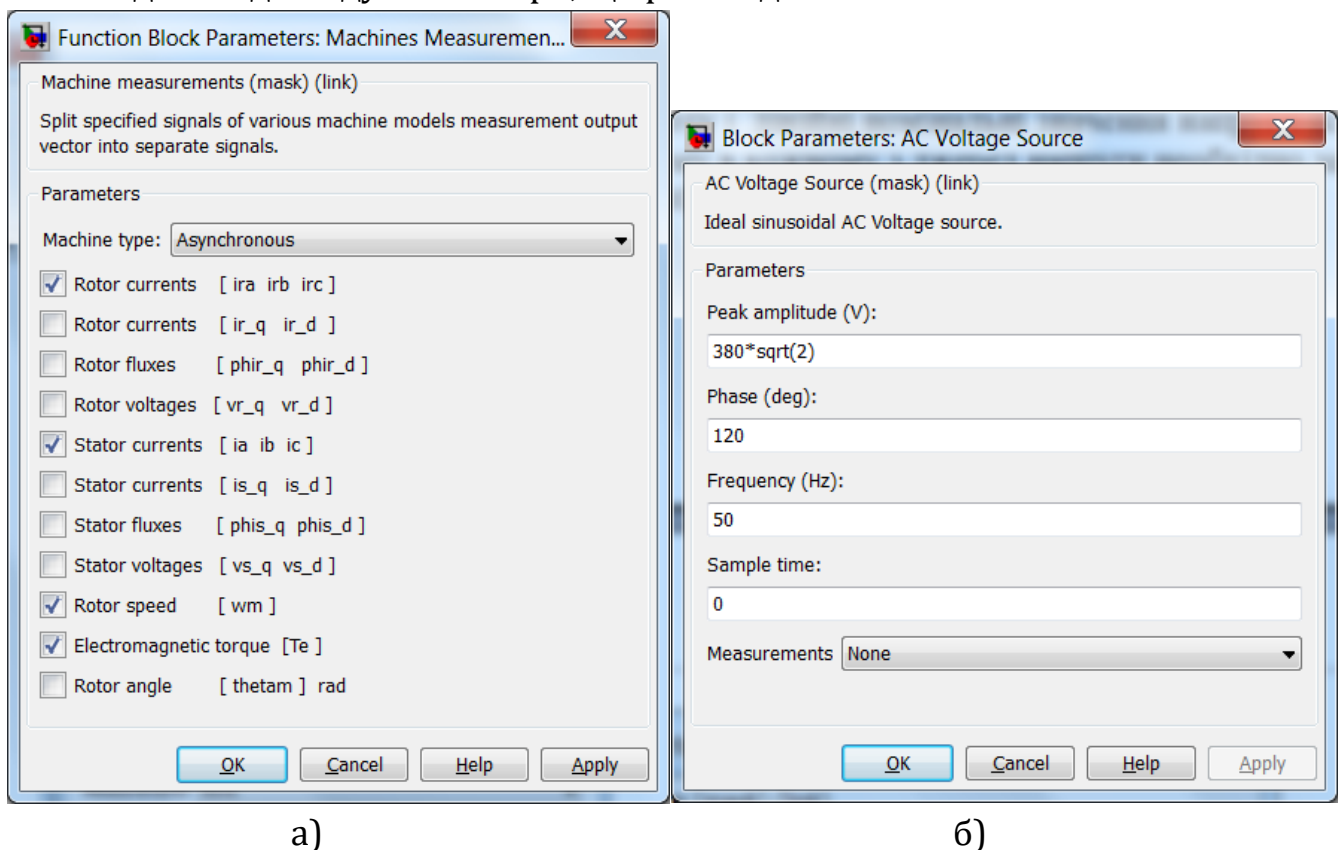


Рис.7 – Параметри елементів:

а) блок вимірювання; б) параметри джерела змінної напруги

d) В елементі **Constant** необхідно задати значення статичного моменту M_c .

Якщо прийняти $M_c = 0$, то буде розглядатися пуск АД без навантаження на валу.

e) Блок PowerGUI є необхідним для моделювання будь-якої моделі Simulink, що містить блоки SimPowerSystems™. Він використовується для зберігання еквівалентної схеми Simulink. При використанні цього блоку в моделі, необхідно дотримуватися таких правил:



powergui

- помістіть блок PowerGUI на верхньому рівні діаграми для оптимальної продуктивності. Ви можете розмістити його в будь-якому місці всередині підсистем для вашої зручності, його функціональність не буде порушена.

- ви можете мати не більше одного блоку PowerGUI в моделі.

- ви повинні назвати блок PowerGUI.

Графічний інтерфейс користувача (GUI) Інструменти Блоку PowerGUI також дає вам доступ до різних інструментів і функцій.

У вікні **Libraries** обрати шлях **Simulink**→**Simscape**→**SimPowerSystem-SpecializedTechnology-powergui**, вибрати і додати один елемент, він є необхідним для моделювання моделей, що містять блоки SimPowerSystems.

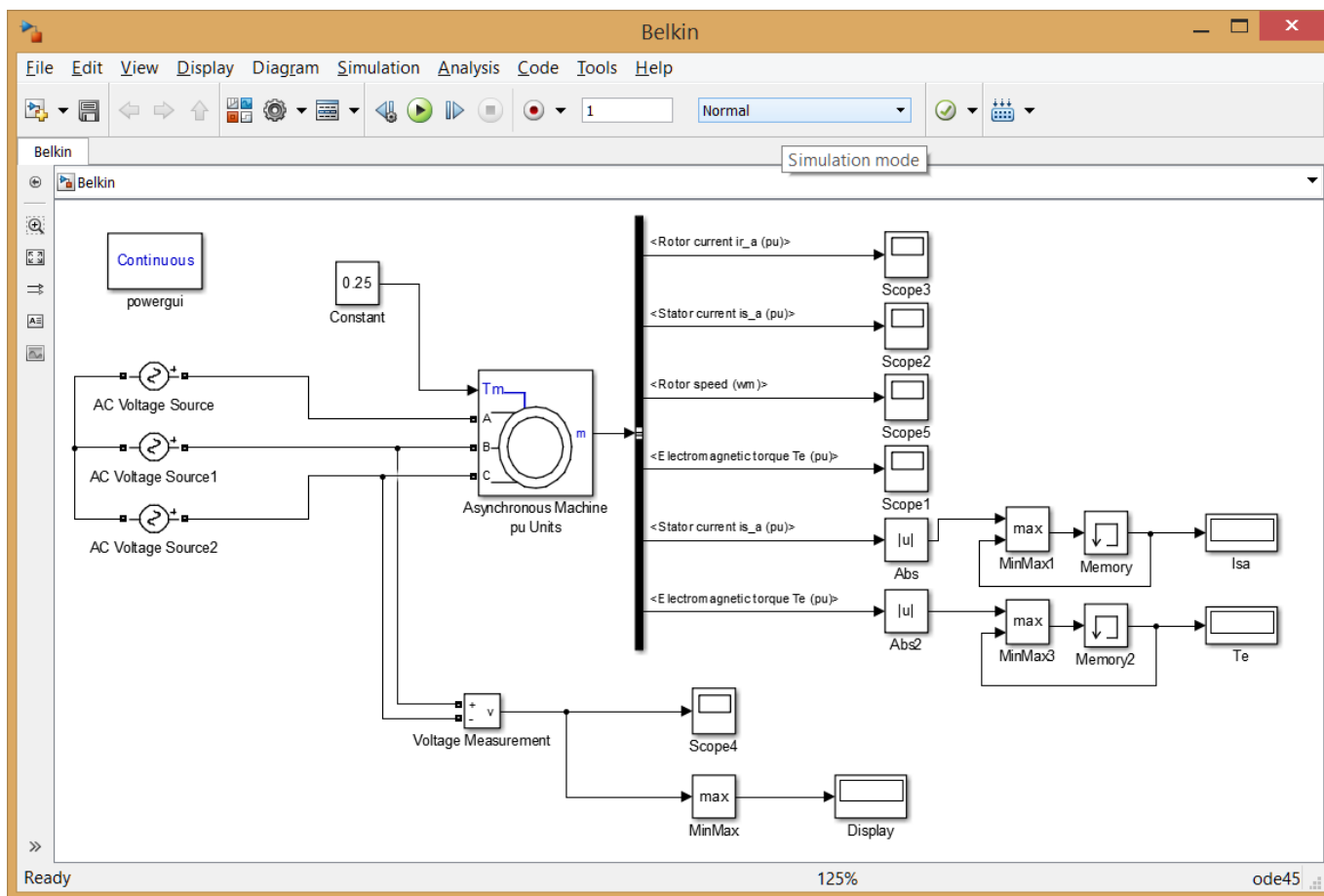


Рис.8 – Структурна схема моделі пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в Matlab 2015

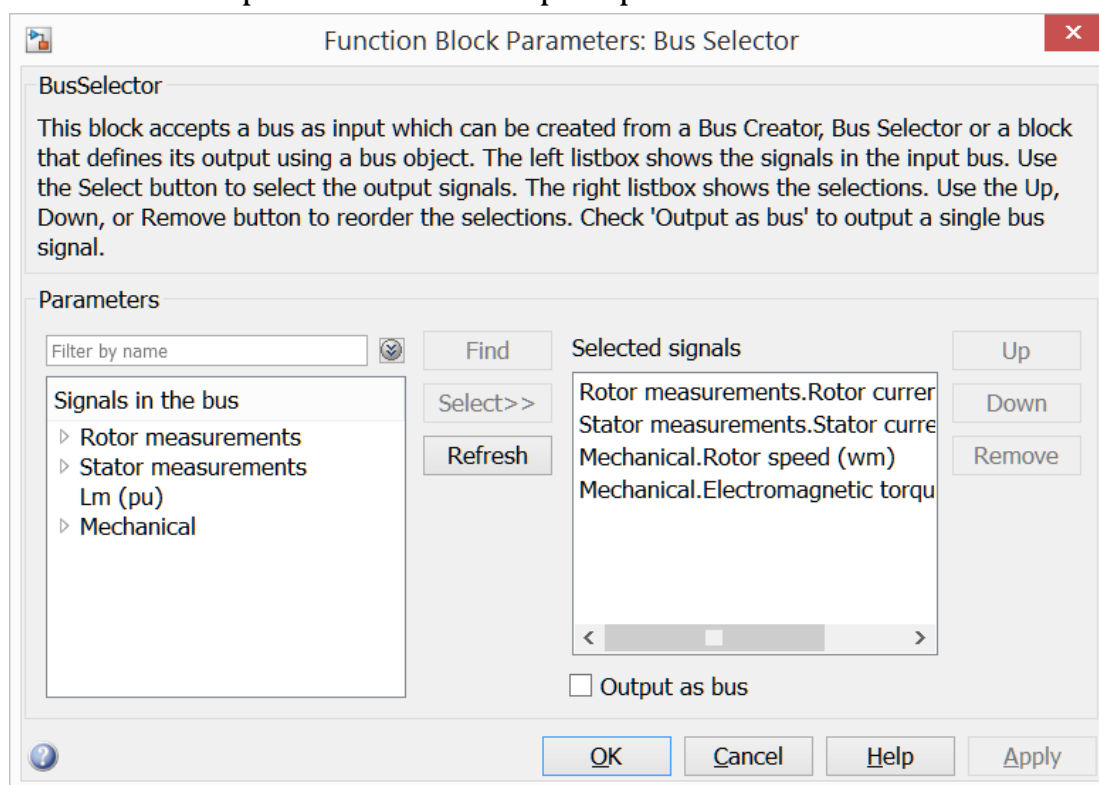


Рис.9 – Параметри об'єкта **Bus Selector**

5. Для узагальнення отриманих результатів необхідно побудувати такі таблиці і відповідні графіки:

k_A	$U_B, \text{В}$	$I_{y\partial}, \text{В.О.}$	$M_{y\partial}, \text{В.О.}$	$t_{poz}, \text{с}$
0	380			
0,1				
...
0,9				
1	0			

k_Φ	$\varphi_B, ^\circ$	$I_{y\partial}, \text{В.О.}$	$M_{y\partial}, \text{В.О.}$	$t_{poz}, \text{с}$
-1	0			
-0,8				
...
0,8				
1	240			

$k_3 = k_A + k_\Phi$	$k_A = k_\Phi$	$I_{y\partial}, \text{В.О.}$	$M_{y\partial}, \text{В.О.}$	$t_{poz}, \text{с}$
0	0			
0,1				
...
1,8				
2	1			

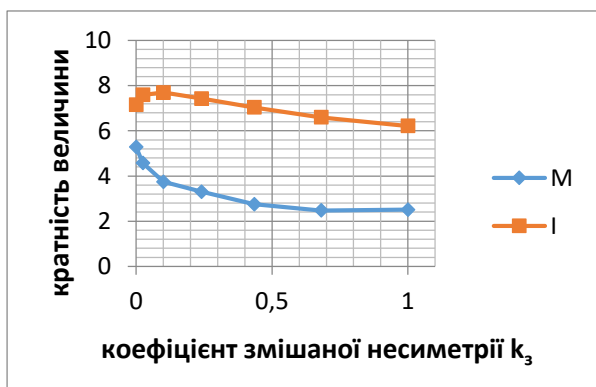


Рис.9.1 – Графіки залежностей ударного струму і максимального електромагнітного моменту в залежності від коефіцієнту змішаної несиметрії k_3

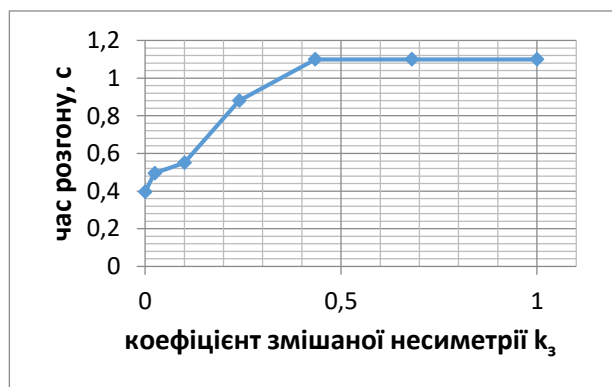


Рис.9.2 – Графік залежності часу розгону в залежності від коефіцієнту змішаної несиметрії k_3

ТЕМАТИЧНЕ ЗАВДАННЯ:
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
В СИНХРОННОМУ ГЕНЕРАТОРІ

Комп'ютерний практикум №3

Математичне моделювання та дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі при короткому замиканні
(2 години)

Мета роботи. Дослідження електромагнітних перехідних процесів, які відбуваються в синхронному генераторі при короткому замиканні його обмотки якоря.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Побудувати структурну схему для моделювання процесу раптового трифазного короткого замикання синхронного турбогенератора на холостому ході в пакеті MatLab – Simulink.

2. Обрати варіант ТГ з даних, що наведені в таблиці 2.

3. Про моделювати процес раптового трифазного короткого замикання синхронного ТГ із заданими параметрами на холостому ході.

4. Побудувати графіки зміни у часі наступних величин:

- струм статора I_1 ;
- електромагнітний момент M_{em} ;
- кут навантаження θ ;
- напруга на обмотці якоря U_a ;
- струм в обмотці збудження i_g ;
- напруга на обмотці збудження U_g ;
- швидкість обертання ротора n ;
- напруга між фазою А і нульовою точкою трансформатора.

5. Дослідити вплив параметрів ТГ x_d і x_d'' на наступні характеристики раптового КЗ:

- ударний струм обмотки якоря;
- ударний електромагнітний момент.

Для цього провести серію розрахунків (8-10 точок) при варіації наступних даних:

- величини індуктивного опору X_d (від $0,1 \cdot X_d$ до $2 \cdot X_d$);
- величини індуктивного опору X_d'' (від $0,1 \cdot X_d$ до $2 \cdot X_d$).

6. Узагальнити отримані результати і написати висновки по роботі.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Класичним прикладом перехідних процесів в синхронних машинах є раптове трифазне коротке замикання синхронного генератора (СГ), що працював на холостому ході. Такий процес супроводжується великими ударними струмами і моментами, які можуть ушкодити конструкцію машини. Тому вивчення цих процесів і дослідження впливу на них окремих параметрів генератора являє актуальну задачу. Особливо це актуально для потужних синхронних генераторів – турбогенераторів (ТГ), на прикладі яких розглядається зазначений процес короткого замикання. Зазвичай ТГ працює на електромережу через підвищуючий трансформатор, а раптове КЗ в більшості випадків відбувається за трансформатором. Цю обставину потрібно врахувати при моделюванні.

Для моделювання процесу короткого замикання ТГ використовується система **MatLab – Simulink**, в якій формується відповідна структурна схема.

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

1. Завантажити на комп'ютері систему MatLab 2015.
2. Увійти в підсистему моделювання динамічних процесів Simulink.
3. Побудувати структурну схему для моделювання процесу раптового трифазного КЗ синхронного турбогенератора на холостому ході (рис.10).

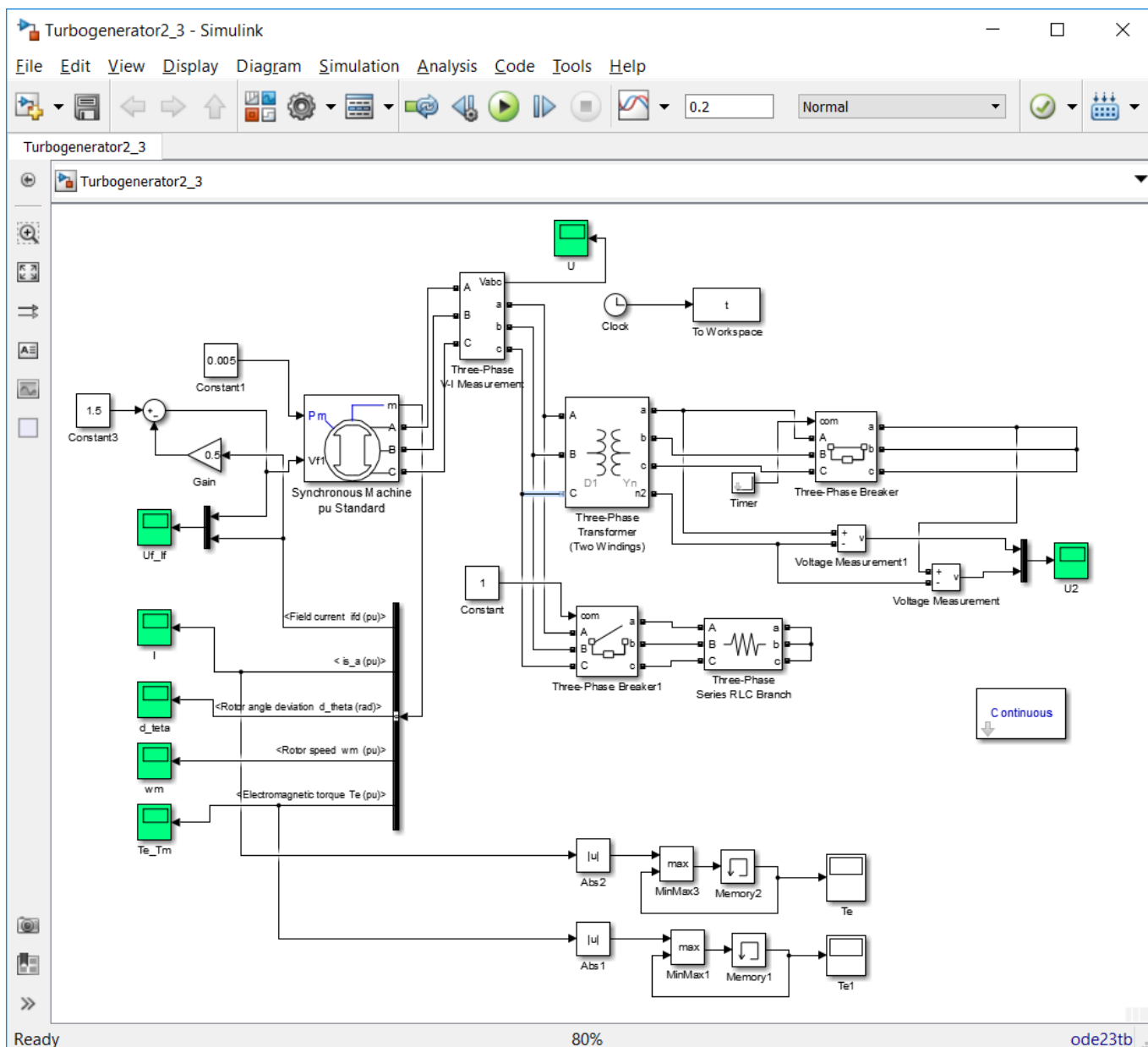
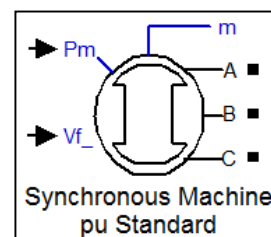


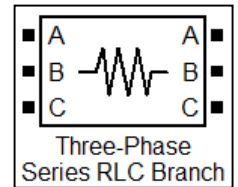
Рис.10 – Структурна схема для моделювання раптового трифазного КЗ

Процедура побудови структурної схеми є аналогічною, як і в попередній частині комп'ютерного практикуму №2. Схема складається з наступних основних елементів:

- Синхронний генератор (турбогенератор) **Synchronous Machine pu Standard** в системі відносних одиниць. На початку процесу ТГ працює в режимі холостого ходу, який моделюється підключенням ТГ до трифазного активного навантаження, що має велике числове значення опору.

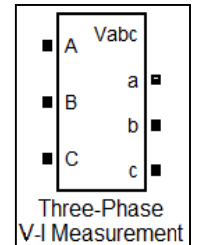


- Трифазне електричне навантаження **Three-phase Series RLC Branch**, яке моделює навантаження ТГ на холостому ході (моделювання початкових умов перехідного процесу короткого замикання). В навантаженні задається відмінною від нуля тільки активна складова опору, величина якої складає $10^3 \dots 10^6$ Ом.

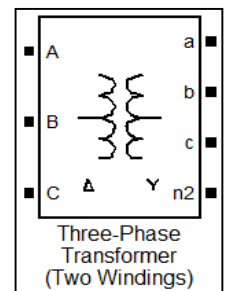


До цього навантаження треба додатково паралельно підключити опір $R = 66$ Ом.

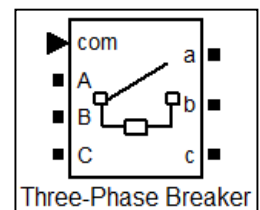
- Трифазний вимірювач електричних величин **Three-phase V-I Measurement** (лінійної напруги U).



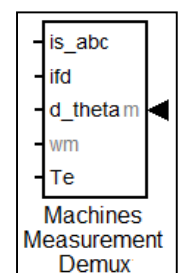
- Трифазний двохобмотковий підвищуючий трансформатор **Three-phase Transformer (two windings)**. Цей елемент моделює вплив параметрів блокового трансформатора на характеристики раптового короткого замикання. Параметри трансформатора мають бути узгоджені з параметрами СГ: $U_1 = U_{CG}$, $U_2 = 220$ кВ. Напругу мережі необхідно задати 220 кВ.



- Два трифазні ключі **Three-phase Breaker**. Один з них призначений для з'єднання ТГ з навантаженням в режимі холостого ходу, другий – для створення короткого замикання на вихідних затискачах блокового трансформатора.



- Функціональний блок для вимірювання параметрів синхронної машини **Machine Measurement Demux**; Основний елемент структурної схеми – синхронний генератор. На рис.11 зображені вікна параметрів СГ.



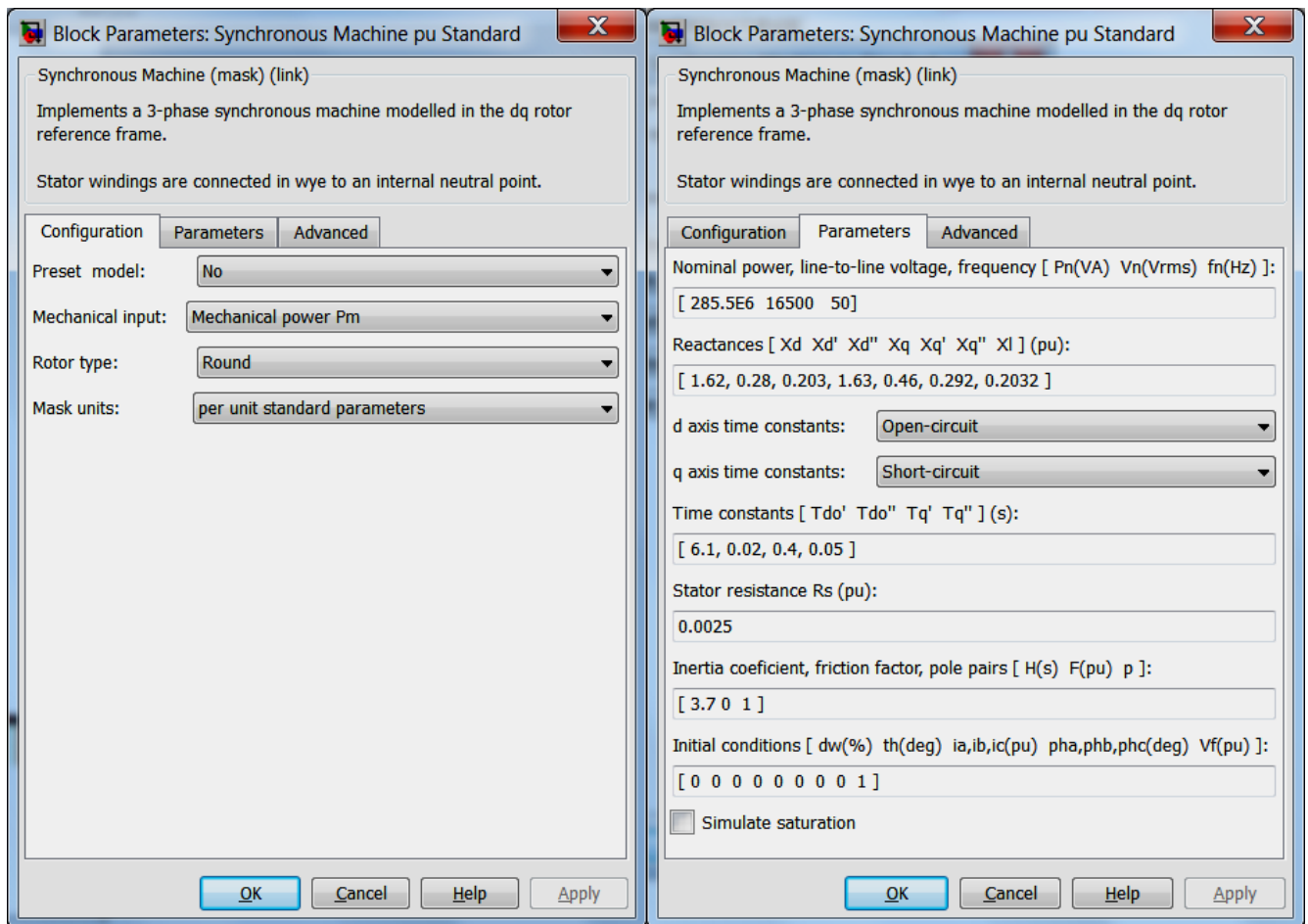


Рис.11 – Вікна параметрів синхронного генератора

Вікна параметрів мають наступні основні вкладки:

- **Configuration.** Дозволяє вибрати одну із запропонованих моделей синхронної машини у вкладці **Preset Mode**. При цьому всі інші параметри машини будуть задаватися автоматично. Якщо у вкладці **Preset Mode** виставити **No**, то надалі потрібно самотійно задати всі параметри синхронної машини.
- **Rotor type.** Дозволяє вибрати тип ротора: явнополісний (Salient-pole) або неявнополісний (Round).
- **Parameters.** В рядках задаються всі параметри СГ. Зокрема у першому рядку задаються номінальні дані машини: номінальна потужність S_n (ВА), лінійна напруга U_n (В), частота f_n (Гц). В наступних рядках задаються електричні параметри СГ x_d, x_d', x_d'' і т.д., постійні часу затухання перехідних струмів T_{d0}', T_{d0}'' і т.д., активний опір обмотки статора, інерційна стала, коефіцієнт тертя, число пар полюсів. В останньому рядку задаються початкові умови.

4. Запустити розроблену модель на розв'язання (закладки **Simulation**→**Start**).

Таблиця 2 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №2

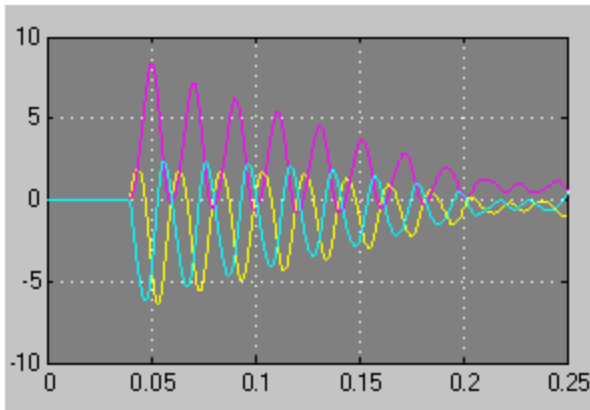
№ ва- ріа- нту	Параметри							Навантаження		
	S_n , МВА	$U_{нГ} =$ $U_{нМ}$, кВ	f_n , Гц	p	Тип рото- ра	H , с	F , в.о.	R , Ом	L , мГн	C , мФ
1	20	6,3	50	1	Я	103	0,0200	30	110	15
2	25	10,5	60	2	НЯ	108	0,0210	110	20	30
3	30	6,3	50	3	Я	113	0,0221	50	110	15
4	35	10,5	60	4	НЯ	119	0,0232	40	15	50
5	40	13,8	50	1	Я	125	0,0243	60	35	110
6	45	15,75	60	2	НЯ	131	0,0255	60	15	30
7	50	18	50	3	Я	138	0,0268	50	30	70
8	55	20	60	4	НЯ	145	0,0281	15	50	30
9	60	24	50	1	Я	152	0,0295	110	30	60
10	65	6,3	60	2	НЯ	159	0,0310	60	30	90
11	70	10,5	50	3	Я	167	0,0326	80	65	15
12	20	6,3	60	4	НЯ	176	0,0342	15	45	60
13	25	10,5	50	1	Я	103	0,0359	70	30	110
14	30	13,8	60	2	НЯ	98	0,0200	60	80	15
15	35	15,75	50	3	Я	93	0,019	80	60	30
16	40	18	60	4	НЯ	88	0,018	80	30	130
17	45	20	50	1	Я	84	0,017	110	95	30
18	50	24	60	2	НЯ	80	0,016	15	110	80
19	55	6,3	50	3	Я	76	0,015	90	15	150
20	60	10,5	60	4	НЯ	72	0,015	80	110	15
21	65	6,3	50	1	Я	68	0,014	110	15	30
22	70	10,5	60	2	НЯ	65	0,013	100	30	170
23	20	13,8	50	3	Я	62	0,013	15	125	30
24	25	15,75	60	4	НЯ	58	0,012	110	30	15
25	30	18	50	1	Я	56	0,011	110	45	190
26	50	18	60	2	НЯ	80	0,026	100	30	170
27	60	24	50	1	Я	152	0,016	15	125	30
28	65	24	50	1	Я	68	0,029	80	60	30
29	25	6,3	60	4	НЯ	58	0,014	80	30	130
30	50	15,75	50	3	Я	138	0,012	60	30	90

Я – явнополюсний СГ, НЯ – неявнополюсний СГ ($x_d = x_q$), для явнополюсного СГ задати значення $T'_q = 0,129 \cdot T'_d$.

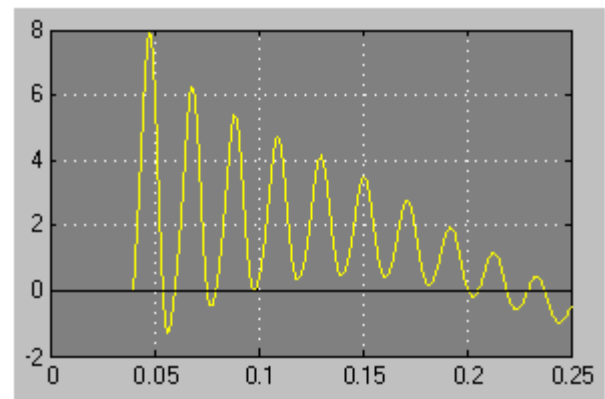
Продовження таблиці 2

№ варіанту	Індуктивні опори							Активний опір	Часові сталі		
	x_d , В.О.	x'_d , В.О.	x''_d , В.О.	x_q , В.О.	x'_q , В.О.	x''_q , В.О.	x_l , В.О.	R_s , В.О.	T'_d , с	T''_d , с	T''_q , с
1	5,190	0,449	0,305	3,089	0,521	0,162	0,144	0,027	6,64	0,045	0,025
2	4,943	0,428	0,291	4,943	0,428	0,291	0,137	0,026	6,33	0,043	0,024
3	4,708	0,407	0,277	2,802	0,472	0,146	0,130	0,024	6,03	0,041	0,023
4	4,483	0,388	0,264	4,483	0,388	0,264	0,124	0,023	5,74	0,039	0,021
5	4,270	0,369	0,251	2,541	0,428	0,132	0,118	0,022	5,47	0,037	0,020
6	4,067	0,352	0,239	4,067	0,352	0,239	0,113	0,021	5,21	0,035	0,019
7	3,873	0,335	0,228	2,305	0,389	0,119	0,107	0,020	4,96	0,034	0,018
8	3,688	0,319	0,217	3,688	0,319	0,217	0,102	0,019	4,72	0,032	0,017
9	3,513	0,304	0,207	2,091	0,352	0,107	0,097	0,018	4,50	0,030	0,017
10	3,346	0,289	0,197	3,346	0,289	0,197	0,093	0,017	4,28	0,029	0,016
11	3,186	0,276	0,187	1,896	0,320	0,097	0,088	0,017	4,08	0,028	0,015
12	3,035	0,263	0,179	3,035	0,263	0,179	0,084	0,016	3,89	0,026	0,014
13	2,890	0,250	0,170	1,720	0,290	0,305	0,080	0,015	3,70	0,025	0,014
14	2,746	0,238	0,162	2,746	0,238	0,162	0,076	0,014	3,52	0,024	0,045
15	2,608	0,226	0,153	1,552	0,262	0,277	0,072	0,014	3,34	0,023	0,043
16	2,478	0,214	0,146	2,478	0,214	0,146	0,069	0,013	3,17	0,021	0,041
17	2,354	0,204	0,138	1,401	0,236	0,251	0,065	0,012	3,01	0,020	0,039
18	2,236	0,193	0,132	2,236	0,193	0,132	0,062	0,012	2,86	0,019	0,037
19	2,124	0,184	0,125	1,264	0,213	0,228	0,059	0,011	2,72	0,018	0,035
20	2,018	0,175	0,119	2,018	0,175	0,119	0,056	0,010	2,58	0,017	0,034
21	1,917	0,166	0,113	1,141	0,192	0,207	0,053	0,010	2,45	0,017	0,032
22	1,821	0,158	0,107	1,821	0,158	0,107	0,050	0,009	2,33	0,016	0,030
23	1,730	0,150	0,102	1,030	0,174	0,187	0,048	0,009	2,22	0,015	0,029
24	1,644	0,142	0,097	1,644	0,142	0,097	0,046	0,009	2,10	0,014	0,028
25	1,562	0,135	0,092	0,929	0,157	0,170	0,043	0,008	2,00	0,014	0,026
26	3,035	0,142	0,179	0,978	0,305	3,035	0,046	0,016	2,105	0,026	0,039
27	2,354	0,263	0,138	1,806	0,236	2,354	0,084	0,012	3,885	0,020	0,037
28	1,917	0,204	0,113	1,401	0,192	1,917	0,065	0,010	3,014	0,017	0,035
29	4,270	0,166	0,251	1,141	0,428	4,270	0,053	0,022	2,455	0,037	0,034
30	1,644	0,369	0,097	2,541	0,165	1,644	0,118	0,009	5,467	0,014	0,032

На рис.12, як приклад, приведені розрахункові осцилограми струмів в фазах обмотки якоря та електромагнітного моменту турбогенератора потужністю 200 МВт при раптовому трифазному КЗ на холостому ході. Початок КЗ починається в момент часу 0,04 с. Струми і момент виражені у відносних одиницях, час у секундах.



а)



б)

Рис.12 – Розрахункові залежності у часі: а) струмів в фазах обмотки якоря; б) електромагнітного моменту

Комп'ютерний практикум №4

Математичне моделювання та дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі при протифазному вмиканні синхронного генератора в електромережу (2 години)

Мета роботи. Дослідження електромагнітних перехідних процесів, які відбуваються в синхронному генераторі при протифазному вмиканні його обмотки якоря в електричну мережу.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

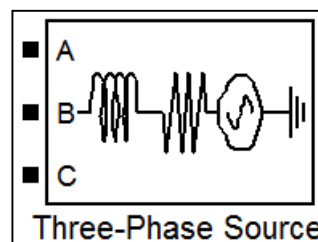
1. Побудувати структурну схему для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу в пакеті MatLab – Simulink.
2. Обрати варіант ТГ з даних, що наведені в таблиці 2.
3. Про моделювати процес протифазного вмикання синхронного ТГ в електромережу.
4. Побудувати графіки зміни у часі наступних величин:
 - струм статора I_1 ;
 - електромагнітний момент M_{em} ;
 - кут навантаження θ ;
 - напруга на обмотці якоря U_a ;
 - струм в обмотці збудження i_g ;
 - напруга на обмотці збудження U_g ;
 - швидкість обертання ротора n ;
 - напруга між фазою А і нульовою точкою трансформатора.
5. Дослідити вплив зміни величини фази мережі $\varphi_{мережі}$ на значення величин ударного струму $I_{y\partial}^*$ і ударного моменту $M_{y\partial}^*$.
6. Узагальнити отримані результати і написати висновки по роботі.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Помилкове протифазне вмикання синхронного генератора в електромережу при його включенні на паралельну роботу є одним з найбільш важких перехідних процесів, який супроводжується великими ударними струмами і моментами. При несприятливих умовах включення, коли ЕРС фази генератора і напруга мережі знаходяться в протифазі, ударні струми і моменти перевищують аналогічні струми і моменти при раптовому КЗ. Тому важливим є дослідження зазначеного процесу.

Для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу використовується система **MatLab – Simulink**, в якій формується відповідна структурна схема.

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

1. Завантажити на комп'ютері систему MatLab.
2. Увійти в підсистему моделювання динамічних процесів Simulink.
3. Побудувати структурну схему для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу (рис.13). Зображена на рис.13 структурна схема відрізняється від представленої на рис.7 схеми дослідження раптового КЗ тим, що на вихідних затискачах блочного трансформатора замість короткозамикаючого з'єднання через вимикач підключається трифазне джерело напруги **Three-phase Source**, яке моделює трифазну електричну мережу.



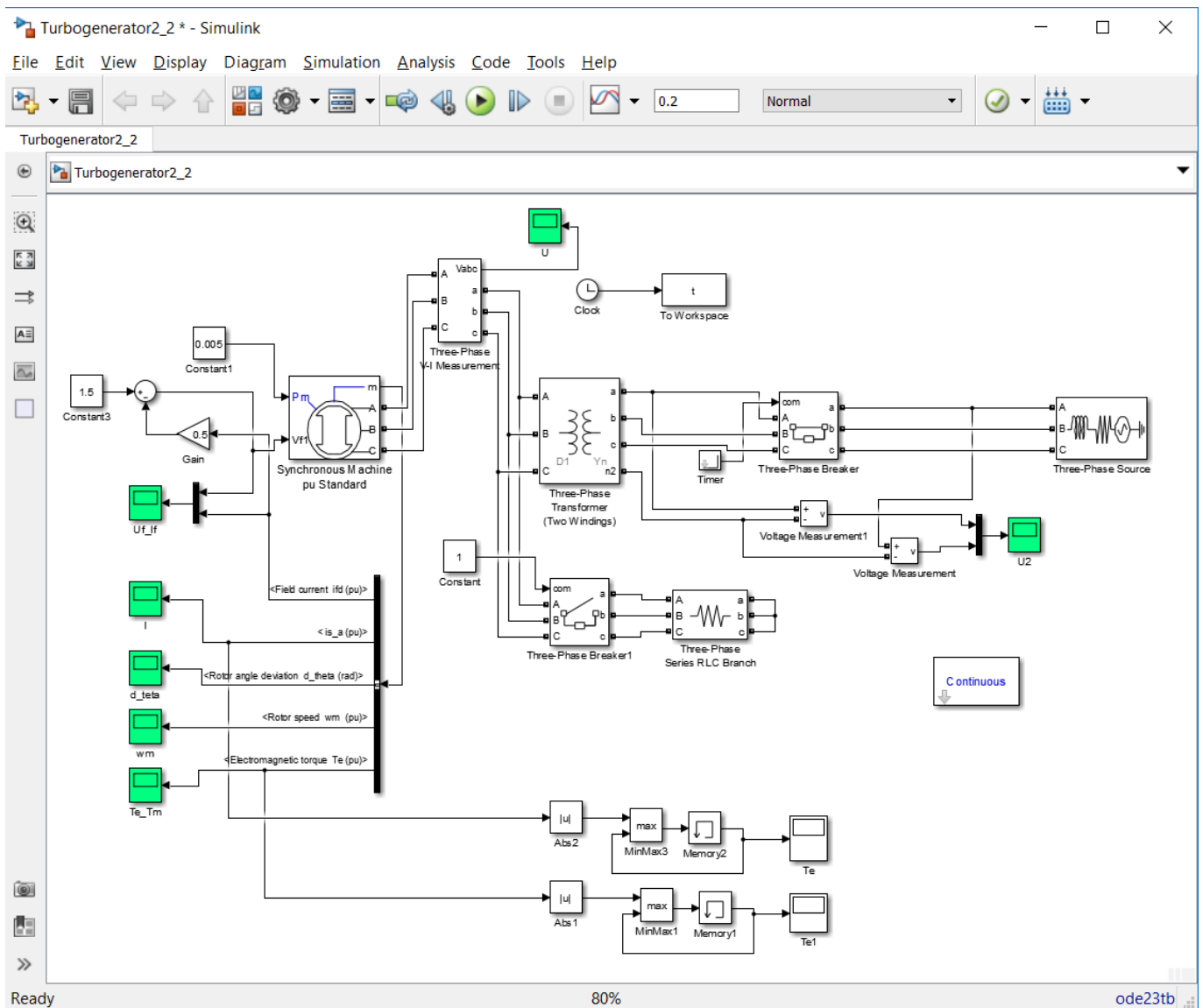


Рис.13 – Структурна схема для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу

В зазначеному елементі **Three-phase Source** (рис.14) необхідно задати: лінійну напругу мережі, фазовий кут зсуву між ЕРС генератора і напругою мережі, частоту струму в мережі, а також електричні параметри мережі (активний і індуктивний опори). У разі, якщо фазовий кут зсуву сягає величини 180° , ударні струми і моменти при перехідному процесі будуть найбільшими. Доцільно дослідити вплив кута на величини ударних струмів і моменту, зокрема при куті 0° буде правильне включення.

4. Запустити розроблену модель на розв'язання (закладки **Simulation**→**Start**).

5. Дослідити вплив зміни величини фази мережі $\varphi_{\text{мережі}}$ на значення величин ударного струму $I_{\text{уд}}^*$ і ударного моменту $M_{\text{уд}}^*$. Навести таблиці і графіки.

$\varphi_{\text{мережі}}$	0	20	...	180
$M_{y\delta}^*$				
$I_{y\delta}^*$				

Block Parameters: Three-Phase Source

Three-Phase Source (mask) (link)

Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters

Phase-to-phase rms voltage (V):
220e3

Phase angle of phase A (degrees):
180

Frequency (Hz):
50

Internal connection: Yg

☐ Specify impedance using short-circuit level

Source resistance (Ohms):
1.6

Source inductance (H):
0.0256

OK Cancel Help Apply

Рис.14 – Параметри **Three-phase Source**

ТЕМАТИЧНЕ ЗАВДАННЯ:
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В ЕЛЕКТРО-
МЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕНЕРГІЇ В ПРОГРАМІ
COMSOL MULTIPHYSICS

Комп'ютерний практикум №5

Математичне моделювання електромагнітного поля силового
трансформатора в програмі Comsol Multiphysics
(4 години)

Короткий опис програми COMSOL Multiphysics:

За допомогою пакета COMSOL Multiphysics можна моделювати практично всі фізичні процеси, які описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних (ДРЧП). Ці рівняння чисельно розв'язуються методом скінченних елементів. Програма містить різні бібліотеки ДРЧП і засоби для моделювання: засоби для геометричних побудов, генератори сітки, різні вирішувачі, які допоможуть швидко впоратися навіть з найскладнішими завданнями лінійних і нелінійних задач. COMSOL Multiphysics дозволяє вирішувати мультифізичні завдання, які описуються комбінацією різних ДРЧП і завдяки цьому є можливість комплексно проаналізувати фізичні моделі. Структура інтерфейсу COMSOL Multiphysics забезпечує простоту і зручність у використанні. Програма COMSOL Multiphysics призначена для розробників, експериментаторів і наукових співробітників. Завдяки широкому вибору функцій зображення результатів розрахунків програма може використовуватися у вищих навчальних закладах.

Мета роботи. Здобути навички роботи з сучасним програмним комплексом Comsol Multiphysics на прикладі математичного моделювання електромагнітного поля силового трансформатора.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Створити коректну математичну модель трансформатора:
 - накреслити поперечний переріз активної частини трансформатора в програмі Autocad;
 - імпортувати геометрію трансформатора в програму Comsol;
 - задати параметри елементів трансформатора;
 - задати параметри часозалежної задачі;
 - задати параметри виведення результатів розрахунку.
2. Розрахувати електромагнітне поле трансформатора
3. Продемонструвати 3 відеоролики:
 - 1) зміна в часі розподілу в розрахунковій області магнітної індукції **mf.normB** і контурів **Az**;

- 2) зміна в часі розподілу в розрахунковій області струмів в обмотках $\mathbf{mf.Jz}$ і контурів \mathbf{Az} ;
- 3) зміна в часі розподілу в розрахунковій області векторного магнітного потенціалу \mathbf{Az} і контурів \mathbf{Az} ;

Особливості процесу моделювання:

1. Варіант трансформатора (Т) для моделювання вибирається таким, який раніше студент спроектував в курсовому проекті при вивченні дисципліни “Основи автоматизованого проектування електричних машин”. Можна також обрати інший варіант з Таблиці 3.

2. При моделювання трансформатора обов’язково в деталях зобразити обмотки трансформатора.



а) Будувати двовимірний активний переріз трансформатора можна в програмах:

- безпосередньо в Comsol Multiphysics за допомогою засобів у вкладці **Geometry**;
- в AutoCad;
- DraftSight;
- в будь-якій іншій доступній програмі з можливістю експорту геометрії трансформатора за допомогою *.dxf-файлів в Comsol Multiphysics.

б) Кожна з двох обмоток на кожному стержні, як відомо, буває трьох видів: гвинтова, циліндрична та безперервна спіральна котушкова обмотка.

в) В кожній з обмоток необхідно обов’язково детально зобразити кожен провідник (можна не розділяючи на паралельні провідники), кількість котушок, кількість слоїв і т.д. Ізоляцію провідників з метою спрощення можна не відображати.

г) Магнітопровід трансформатора зображується нешихтованим.

д) Процес креслення, наприклад, в AutoCad, необхідно виконувати охайно і точно. Оскільки якщо між двома лініями залишиться проміжок (тобто не використовувалася команда , або ), то в процесі побудови сітки скінченних елементів в цій точці програма Comsol Multiphysics видасть помилку і доведеться перемальовувати в AutoCad, вже більш охайно).

3. В загальному випадку створювати модель трансформатора або асинхронного двигуна можна як без насичення, просто задавши незмінну магнітну проникність заліза μ_{Fe} , або робити розрахунки із врахуванням ефекту магнітного насичення магнітопроводу, що збільшує час розрахунку. Цей вибір студент робить на свій розсуд.

4. Розрахунок математичної моделі здійснюється для режиму номінального навантаження.

Таблиця 3 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №5. Моделювання трансформатора

Варіант	1*	2*	3*	Вид обмотки НН	4*	Вид обмотки ВН	5*	6*	7*, 8*, 9*, 10*	$J_{HH} = J_{BH}, \times 10^6 \text{ A/m}^2$	μ_{Fe}
1	120	480	140	Циліндрична	6	НСКО	15	4	40	4,00	800
2	127	507	147	Гвинтова	9	Циліндрична	16	5	50	4,15	900
3	133	533	153	НСКО	7	НСКО	17	6	60	4,30	1000
4	140	560	160	Циліндрична	8	Циліндрична	14	7	70	4,45	1100
5	147	587	167	Гвинтова	11	НСКО	18	4	40	4,60	1200
6	153	613	173	НСКО	13	Циліндрична	10	5	50	4,75	1300
7	160	640	180	Циліндрична	15	НСКО	12	6	60	4,90	1400
8	120	480	140	Гвинтова	16	Циліндрична	6	7	70	5,05	1500
9	127	507	147	НСКО	17	НСКО	9	4	40	5,20	1600
10	133	533	153	Циліндрична	14	Циліндрична	7	5	50	5,35	800
11	140	560	160	Гвинтова	18	НСКО	8	6	60	5,50	900
12	147	587	167	НСКО	10	Циліндрична	11	7	70	5,65	1000
13	153	613	173	Циліндрична	12	НСКО	13	4	40	5,80	1100
14	160	640	180	Гвинтова	6	Циліндрична	7	5	50	5,95	1200
15	120	480	140	НСКО	9	НСКО	15	6	60	6,10	1300
16	127	507	147	Циліндрична	7	Циліндрична	16	7	70	6,25	1400
17	133	533	153	Гвинтова	8	НСКО	17	4	40	6,40	1500
18	140	560	160	НСКО	11	Циліндрична	14	5	50	6,55	1600
19	147	587	167	Циліндрична	13	НСКО	18	6	60	4,00	800
20	153	613	173	Гвинтова	15	Циліндрична	10	7	70	4,15	900
21	160	640	180	НСКО	16	НСКО	12	4	40	4,30	1000
22	120	480	140	Циліндрична	17	Циліндрична	6	5	50	4,45	1100
23	127	507	147	Гвинтова	14	НСКО	9	6	60	4,60	1200
24	133	533	153	НСКО	18	Циліндрична	7	7	70	4,75	1300
25	140	560	160	Циліндрична	10	НСКО	8	4	40	4,90	1400
26	147	587	167	Гвинтова	12	Циліндрична	11	5	50	5,05	1500
27	153	613	173	НСКО	6	НСКО	13	6	60	5,20	1600
28	160	640	180	Циліндрична	9	Циліндрична	7	7	70	5,35	800
29	120	480	140	Гвинтова	7	НСКО	18	4	40	5,50	900
30	127	507	147	НСКО	8	Циліндрична	10	5	50	5,65	1000

Позначення:	
1*	Діаметр стержня, мм
2*	Висота стержня, мм
3*	Висота ярма, мм
4*	Кількість шарів/витків/катушок обмотки НН
5*	Кількість шарів/витків/катушок обмотки ВН
6*	Ізоляція між шарами/витками/катушками, мм
7*	Ширина обмотки НН, мм
8*	Ширина обмотки ВН, мм
9*	Відстань між обмотками НН и ВН, мм
10*	Відстань між обмотками ВН сусідніх фаз, мм

Відстань (товщину ізоляції) від обмоток до ярма і довжину ярма студент вибирає самостійно.

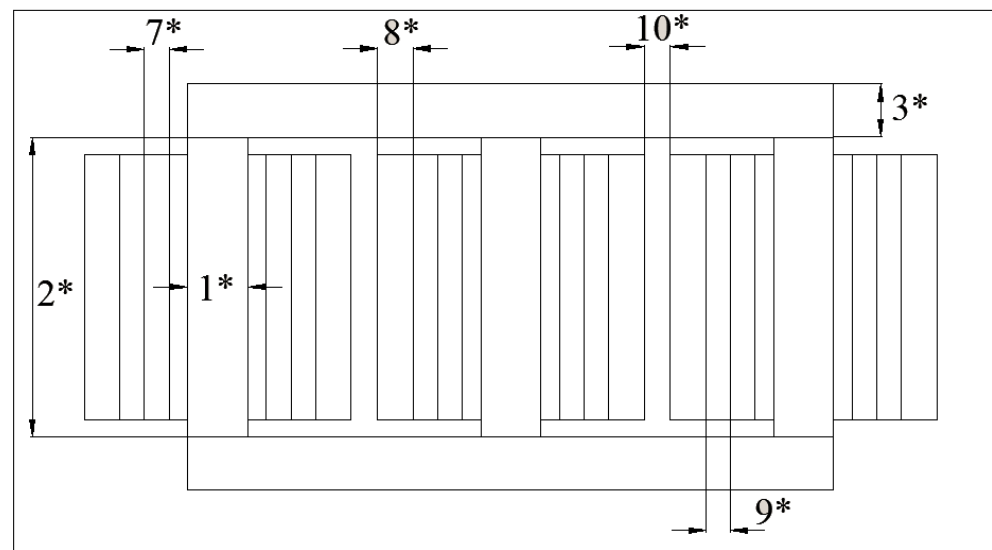
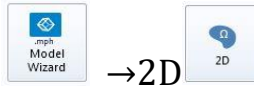


Рис. 15 – Ескіз трансформатора

Алгоритм побудови моделі трансформатора (без насичення)

1. Побудова починається з вибору геометрії 2D (не вибирати вісесиметричну):
Відкрити Comsol Multiphysics (створити новий *.mph файл)

File→New→Model Wizard



→2D

2. Вибрати фізику **Magnetic fields (mf)** у вкладці AC/DC, додати (add)
вибрану фізику і натиснути **Done**

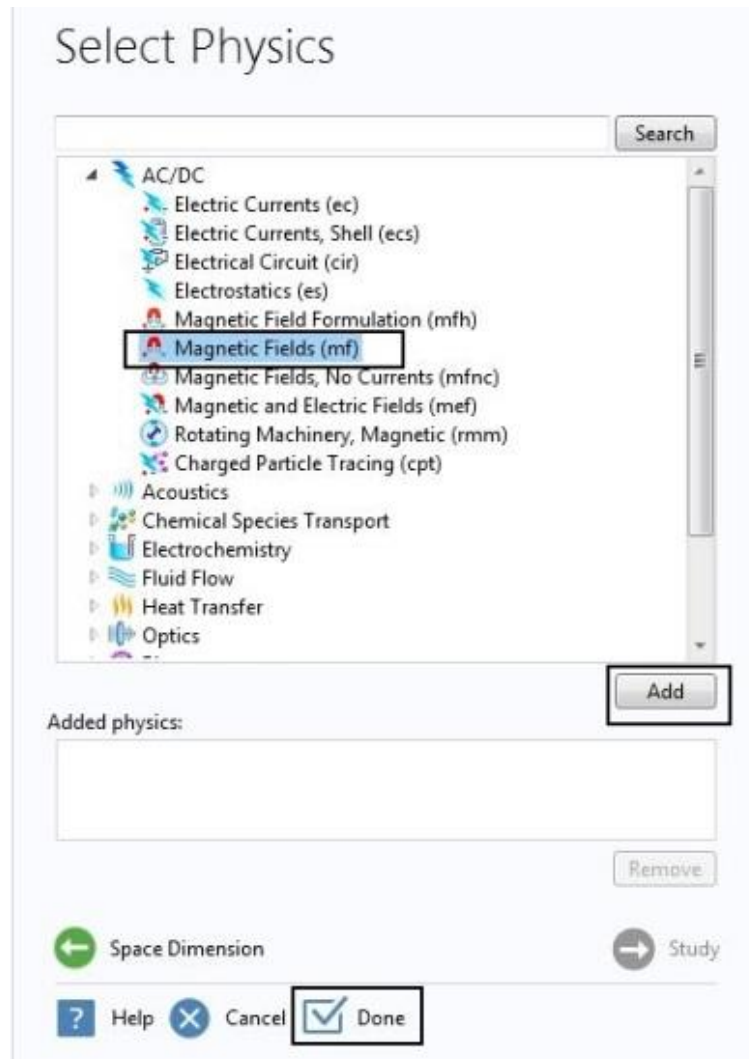


Рис.16 – Вибір фізики математичної моделі

3. В САД-програмі, з якої буде імпортуватись креслення навколо трансформатора необхідно створити прямокутник для того, щоб в цій області в подальшому відображались магнітні поля навколо обмоток.
Після цього – зберегти файл в форматі *.dxf

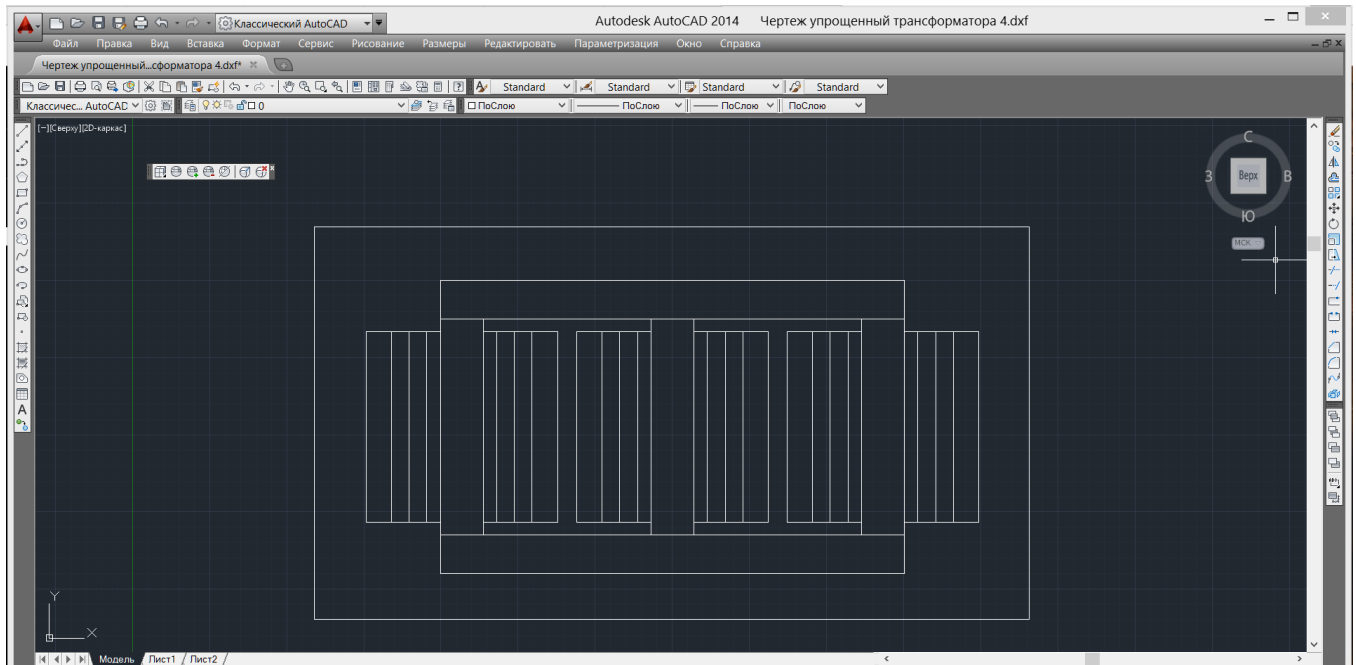


Рис.17 – Креслення Т в програмі Autocad

4. У вкладці **Model Builder** правою кнопкою мишки обрати **Global Definition** і додати **Variables**

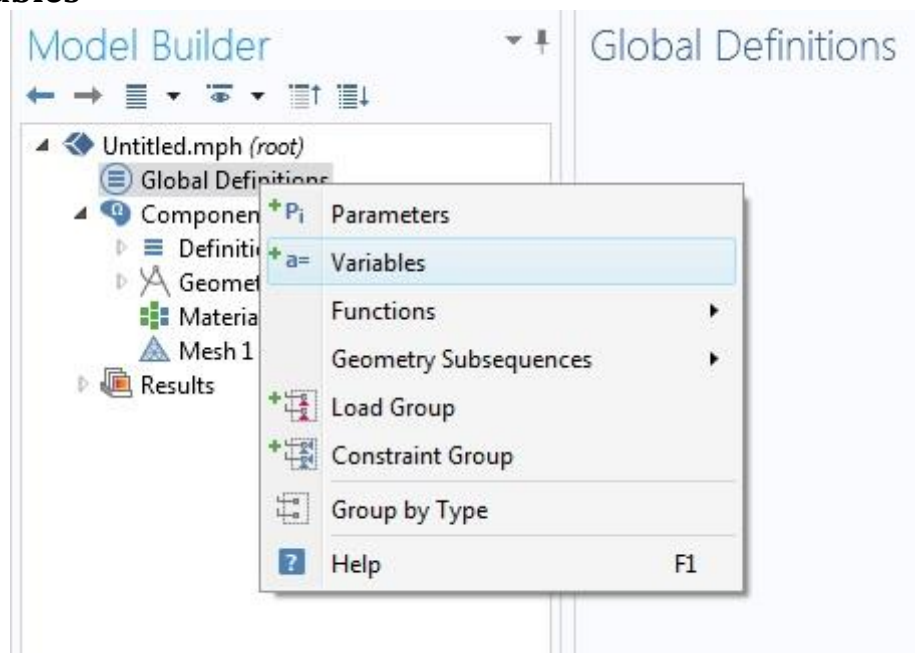


Рис.18 – Додання **Variables** у вкладці **Model Builder**

5. Щоб створити трифазну систему струмів, необхідно додати наступні змінні:

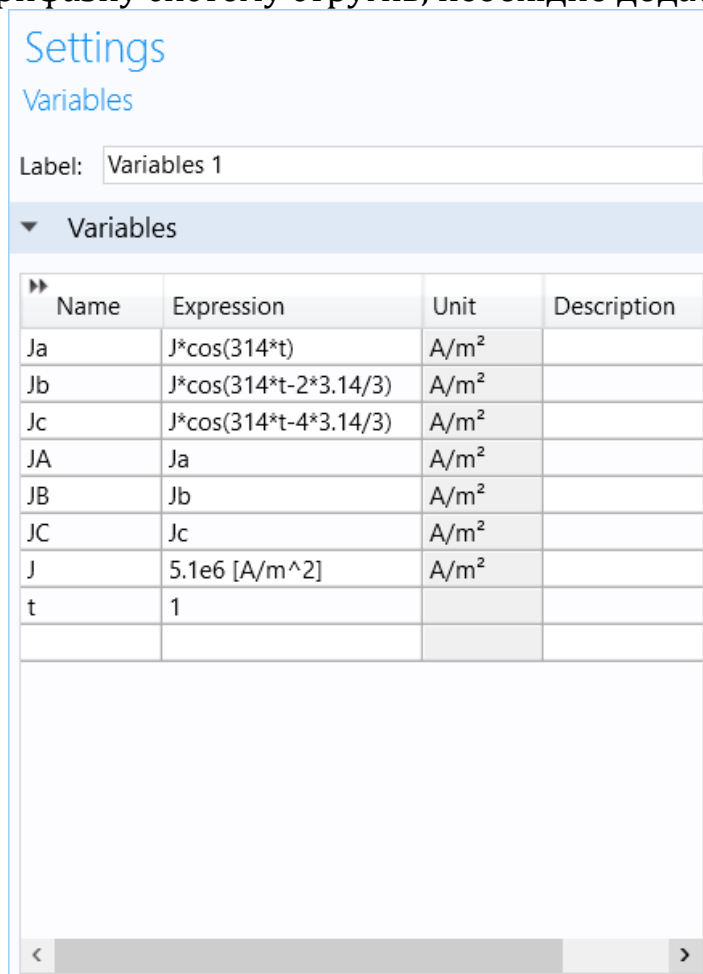


Рис.19 –Задання струмів у вкладці **Variables**

Вказавши одиниці вимірювання тільки у **J** вони автоматично присвоюються усім виразам, які містять **J**. Одиниці вимірювання для **t** не задаємо, бо вони вказуються далі.

6. У вкладці **Geometry1** додати **Import**:

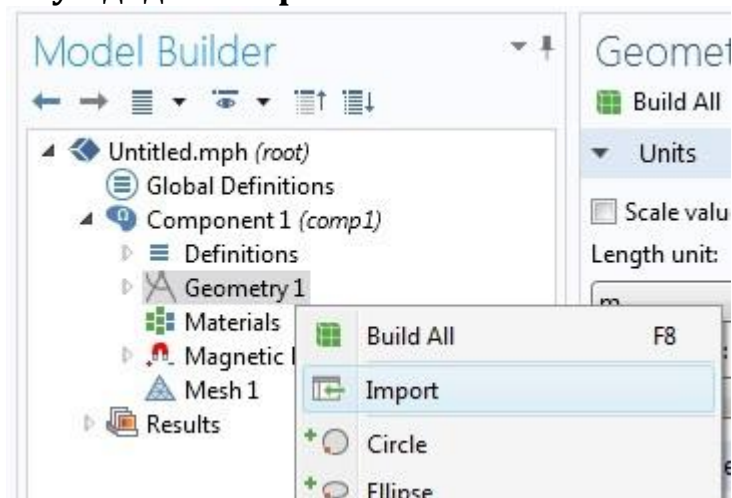


Рис.20 –Додавання вкладки **Import**

7. Відкрити файл, створений раніше у CAD-програмі та імпортувати його, натиснувши кнопку **Import**:

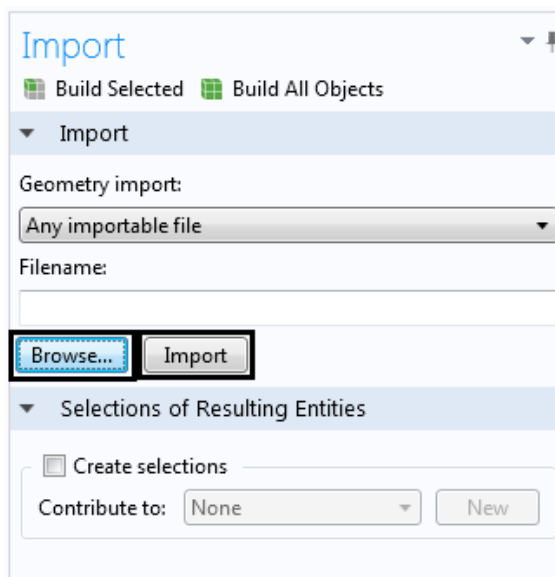


Рис.21 –Імпортування геометрії з файла

8. Для того, щоб задати масштабування в міліметрах (якщо цього не було зроблено в AutoCad) необхідно відкрити **Geometry**→**Transforms**→**Scale** і вибрати всі елементи в вікні **Graphics** (Ctrl+A), прописавши Scale Factor =0.001 та натиснувши “Build All”.

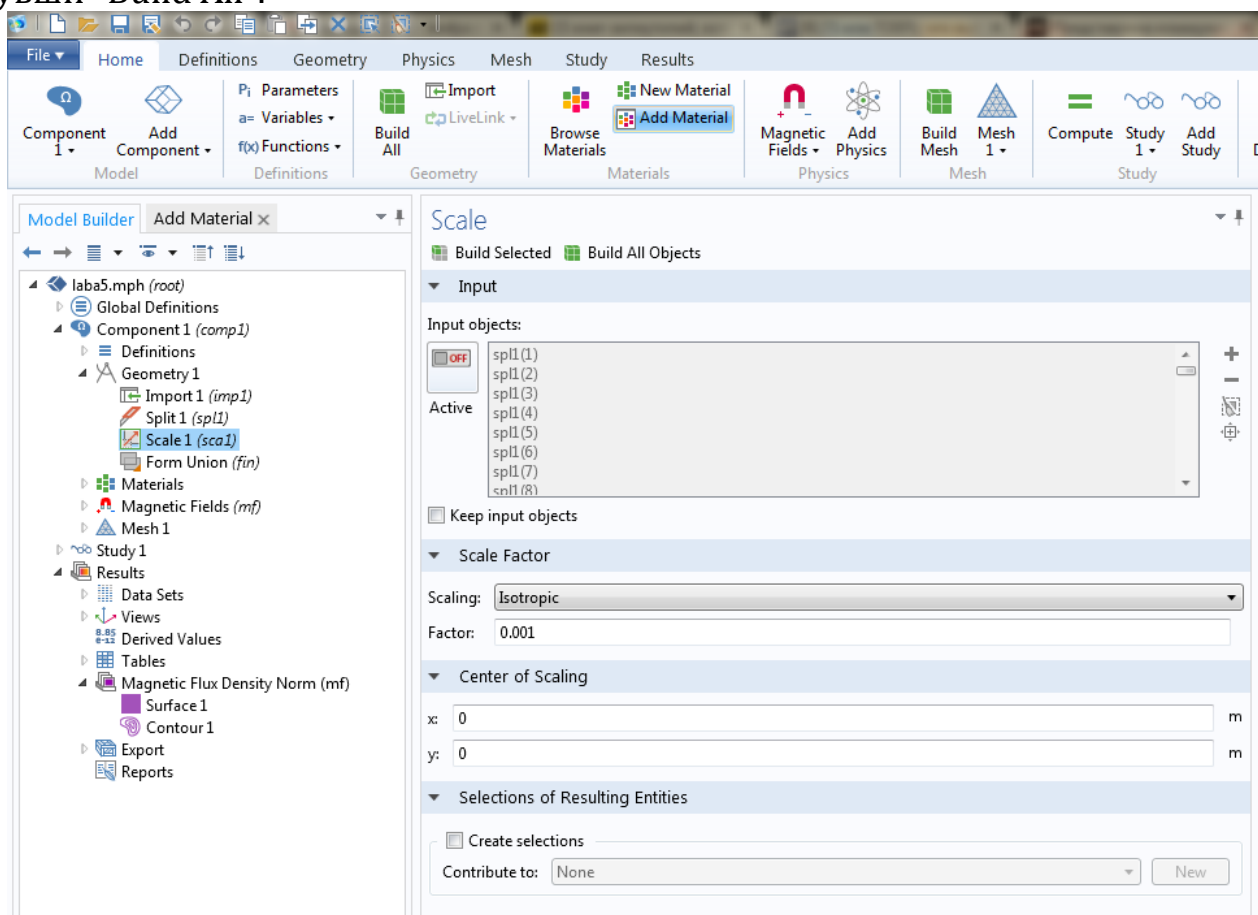
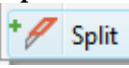


Рис.22 –Зміна масштабу імпортованої геометрії

9. Розбити креслення на окремі елементи за допомогою доданої вкладки **Geometry1**→**Conversions** →  і активувати параметр **Split** кнопкою **ON**



Після цього клікнути на макет креслення в полі **Graphics** щоб додати його до параметрів **Input**.

Лівою кнопкою мишки клікнути на вкладку **Geometry1** та натиснути у вікні Geometry – **Build All** (або F8).

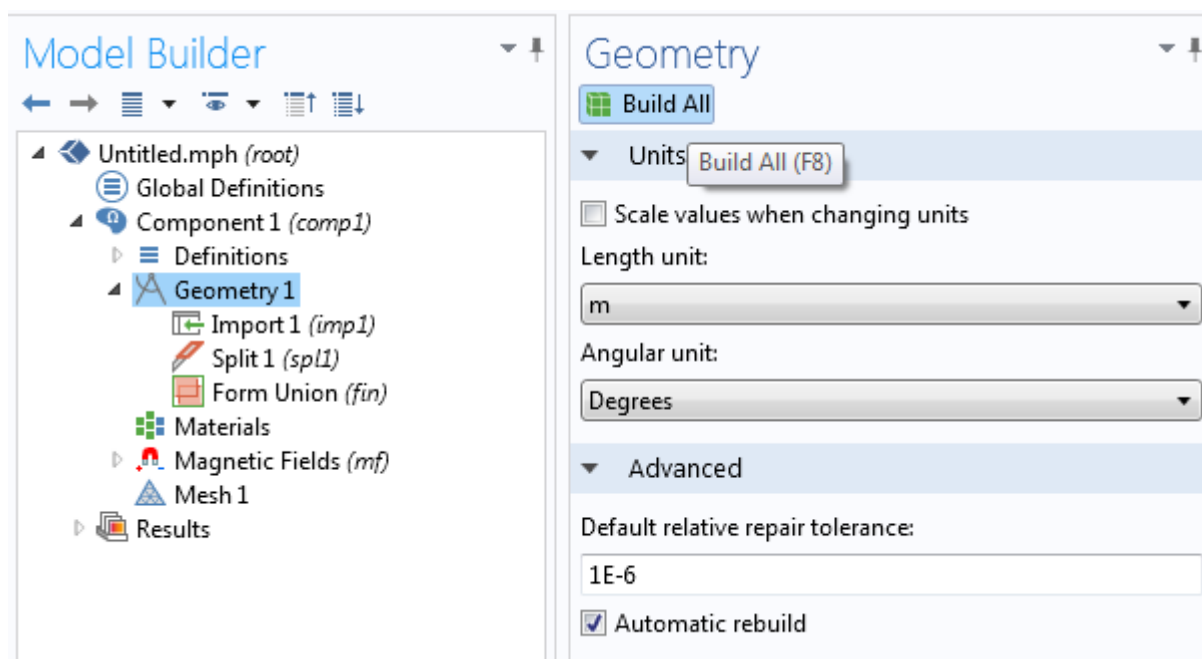




Рис.23 – Побудова всіх елементів у вкладці **Geometry1**

10. Використовуючи **Material library** у вкладці **Materials** додати матеріали: “повітря” і “залізо”. Мідь в обмотках задавати не треба, бо в даній задачі обмотки слугують як джерела поля і в них не досліджуються вихрові струми.

Для цього у вкладці  **Materials** обрати  **Add Material**

Та у новому вікні додати **Soft iron (without losses)** та **Air** :

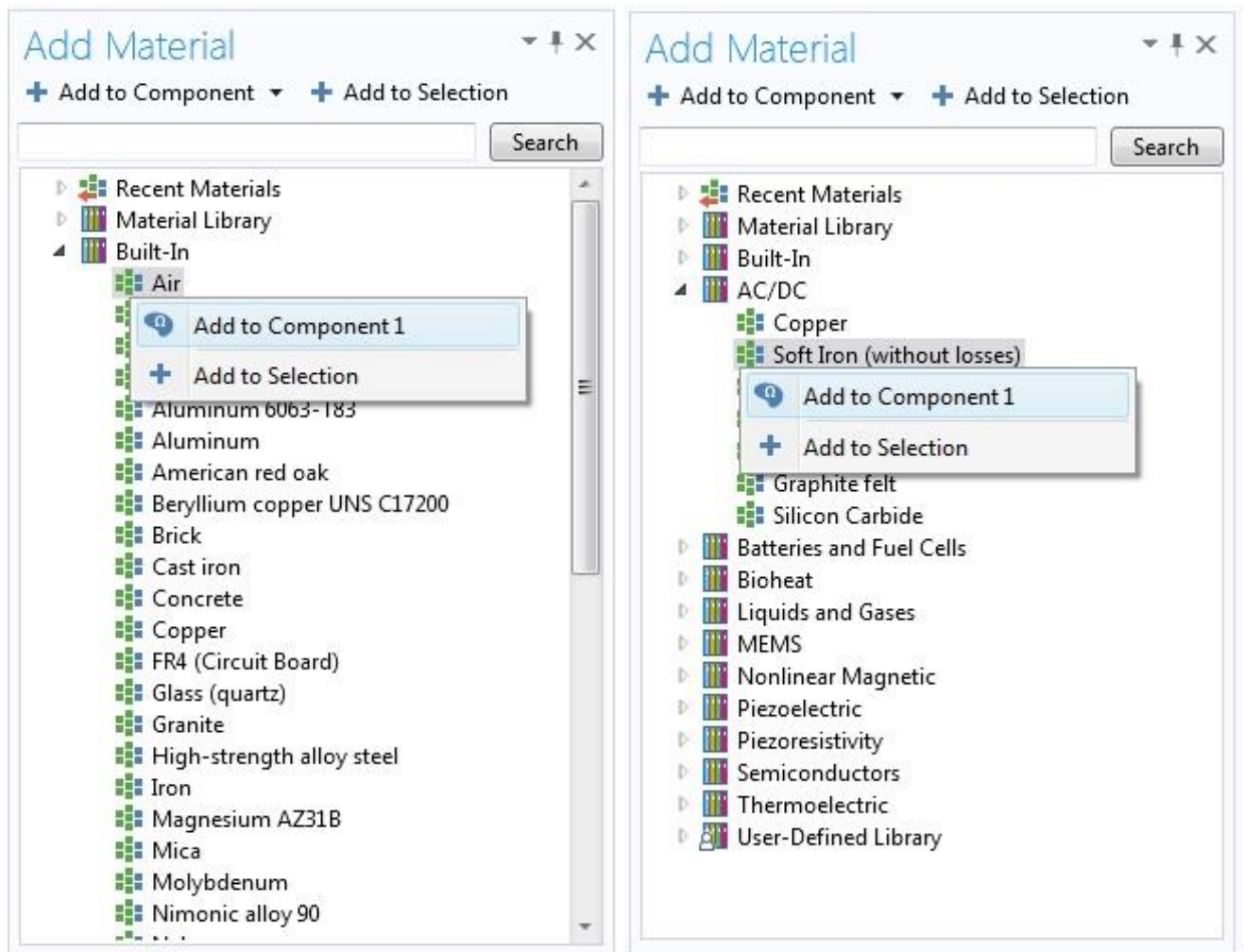


Рис.24 – Додавання матеріалів з бібліотеки матеріалів

11. Задати магнітну проникність заліза, $\mu=1000$, клікнувши на **Materials**→

► **Soft Iron (without losses) (mat1)**, та обравши вікні **Material** відповідний параметр

»	Property	Name	Value
⚠	Relative permeability	mur	1000

Рис.25 – Задання μ матеріалу

Після цього – у вікні **Graphics** обрати блоки, що відповідають магнітопроводу трансформатора.

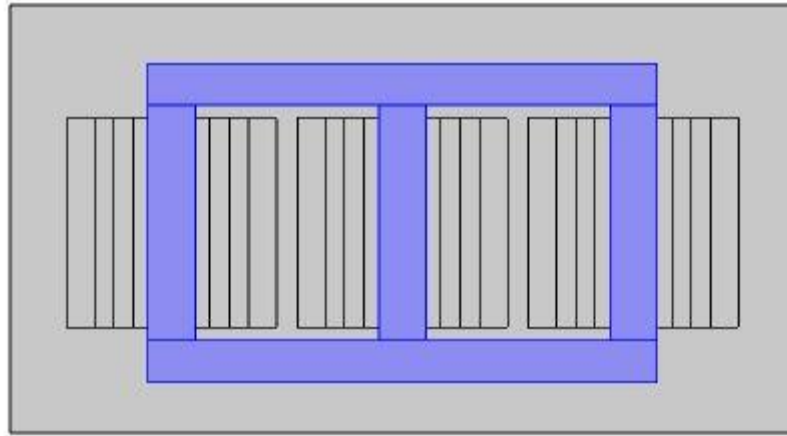



Рис.26 – Вибір елементів магнітопроводу

Клікнувши на вкладку  Air (mat2) , обрати блоки, що відповідають області, з магнітною проникністю повітря (в тому числі – обмотки):

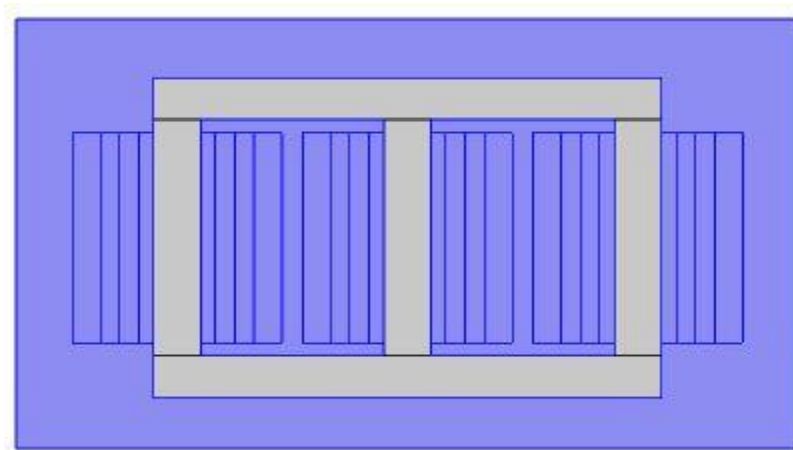


Рис.27 – Вибір всіх елементів окрім магнітопроводу

12. Для врахування ефекту насичення в магнітопроводі необхідно:
У вкладці **Magnetic Fields (mf)** додати вкладку **Ampere's Law**:

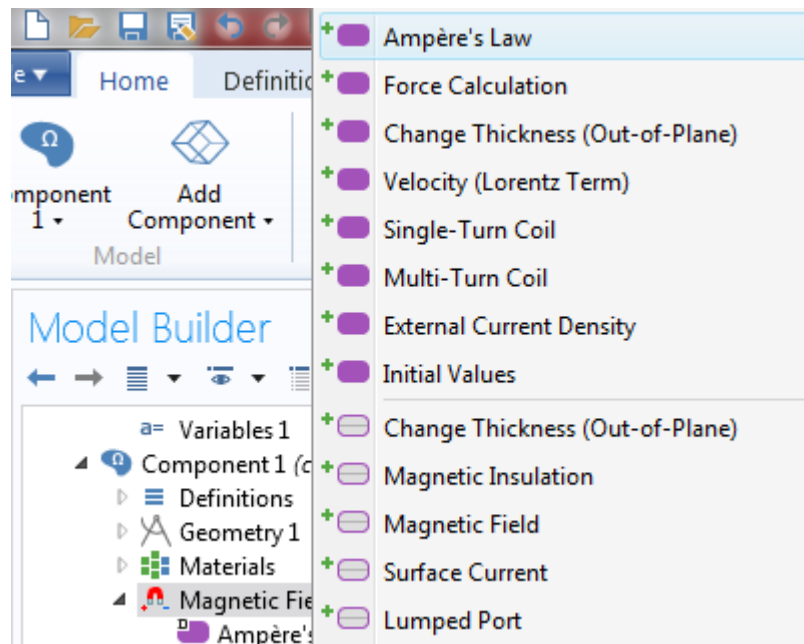


Рис.28 – Додавання вкладки фізичних властивостей **Ampere's Law**

13. Натиснувши на вкладку **Ampere's Law** вибрати магнітопровід (залізо):

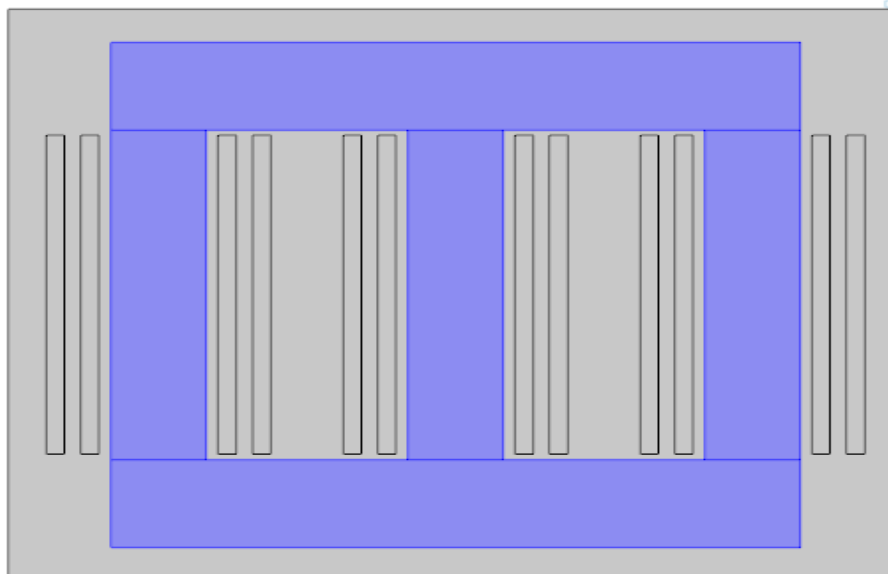


Рис.29 – Додавання фізичних властивостей **Ampere's Law**

14. Змінити внизу цього ж **Ampere's Law** у вікні **Magnetic Field** на **HB curve**:

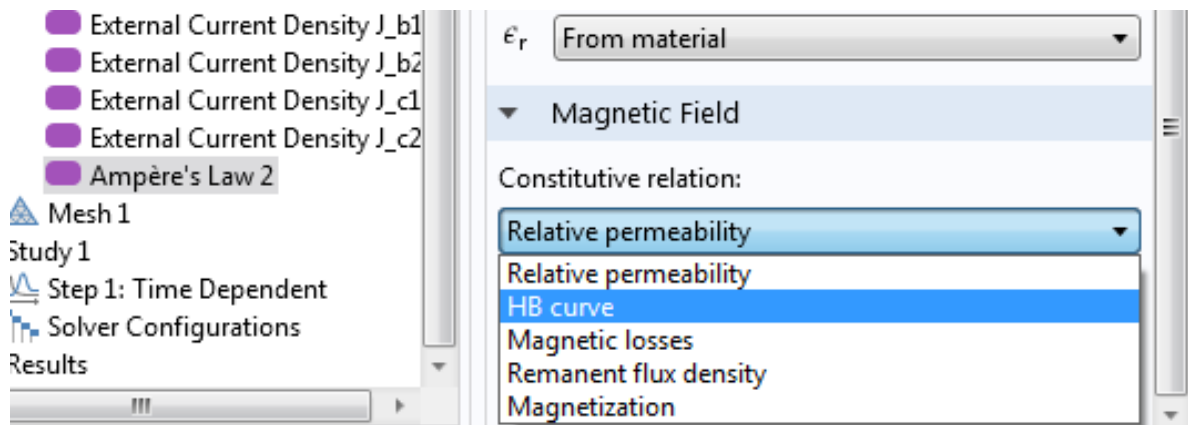


Рис.30 – Зміна параметрів у вкладці **Ampère's Law**

15. Задати трифазну систему струмів.

Для цього, в вікні **Model Builder**, обрати **External Current Density**

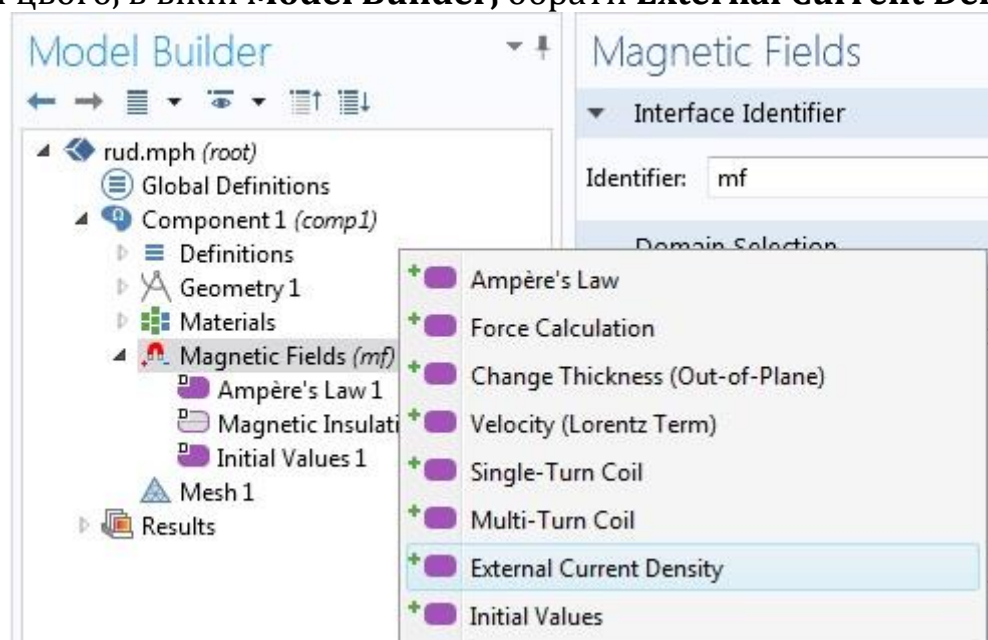


Рис.31 – Задання зовнішніх джерел густин струму

Та створити для обмоток кожної фази свій параметр **External Current Density** (12шт.), обравши відповідну область в вікні **Graphics**.

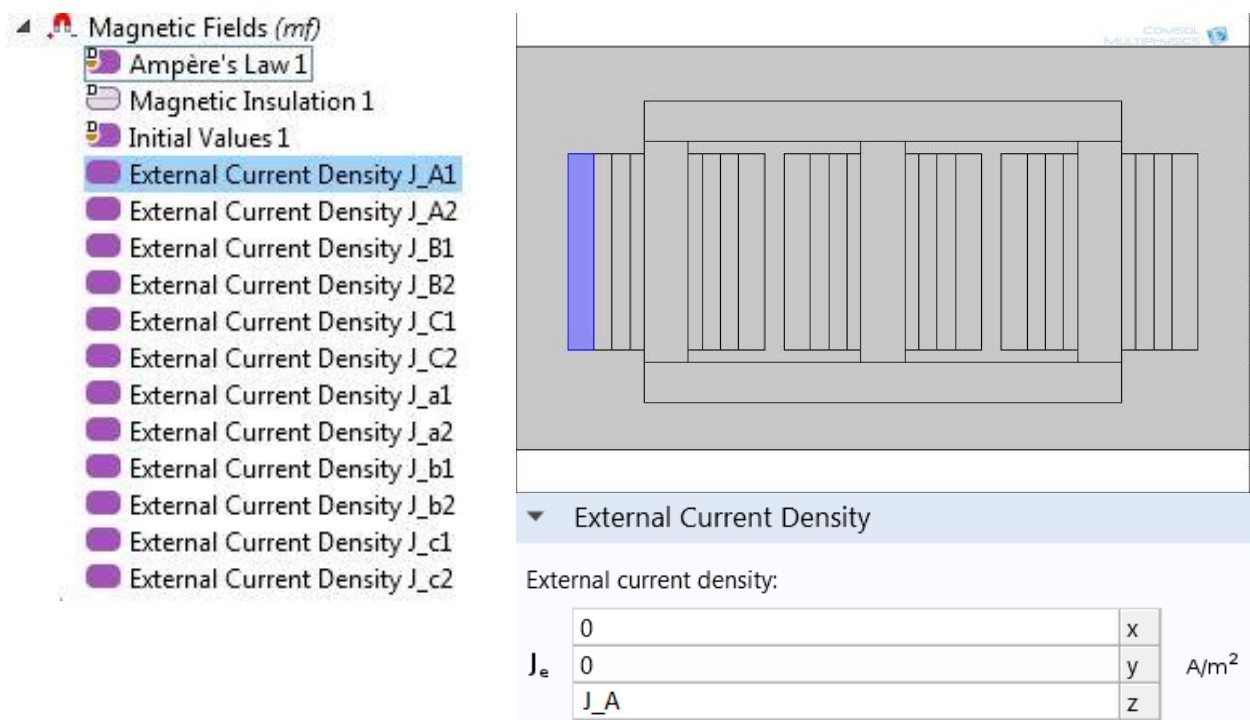


Рис.32 – Задання зовнішніх джерел густин струму в обмотках Т, що направлені в площину

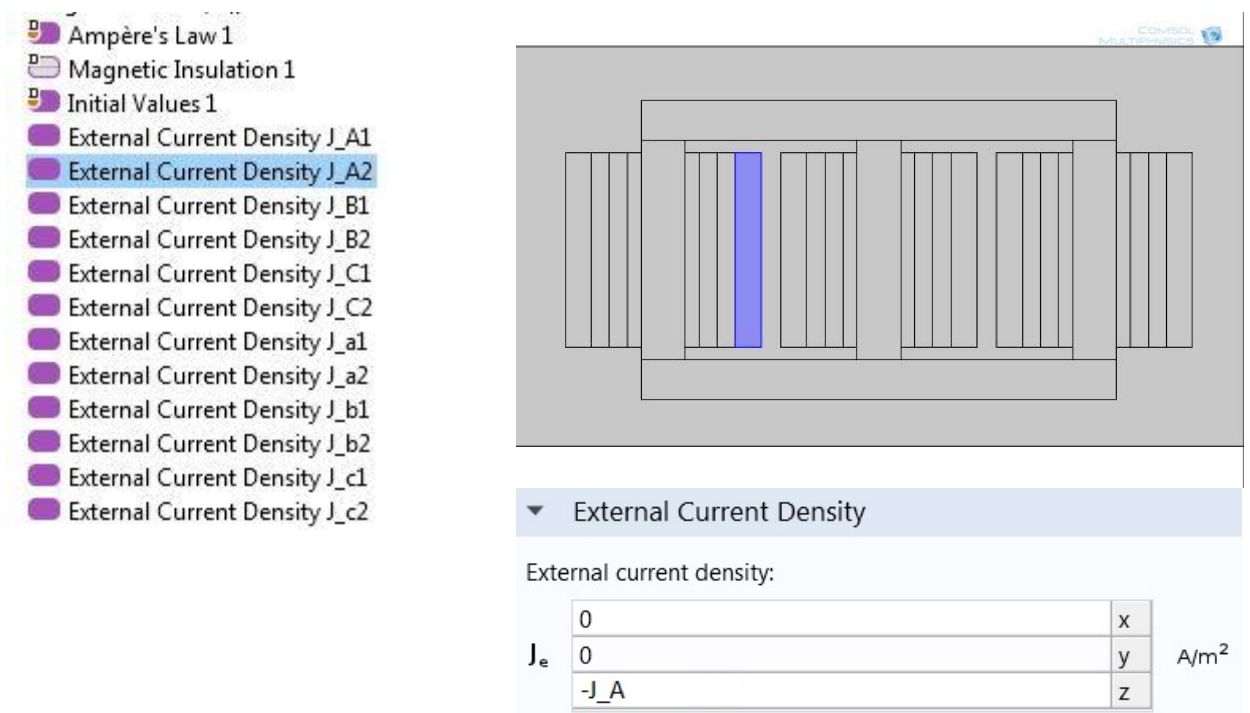


Рис.33 – Задання зовнішніх джерел густин струму в обмотках Т, що направлені з площини

Індекс 1 означає, що струми направлені в площину, а індекс 2 – з площини. При цьому необхідно враховувати зворотній напрям протікання струму в кожній з фаз.

16. Додати **Free Triangular** у вкладці **Mesh** :



Рис.34 – Додання параметрів сітки **Free Triangular** у вкладці **Mesh**

17. Додати параметр **Time Dependent** у вкладці **Study1**, попередньо додавши **Study1** на панелі інструментів:

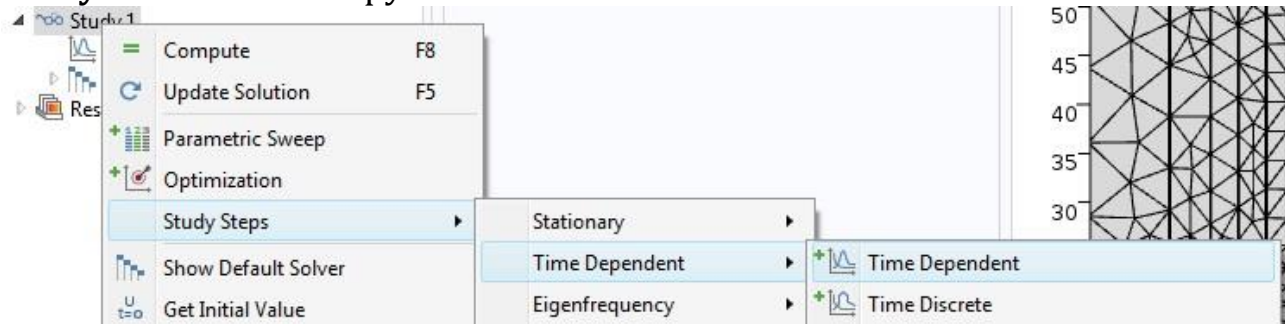


Рис.35 – Задання параметрів **Time Dependent** у вкладці **Study1**

Також – виставити необхідні параметри для **Time Dependent** у відповідному вікні.

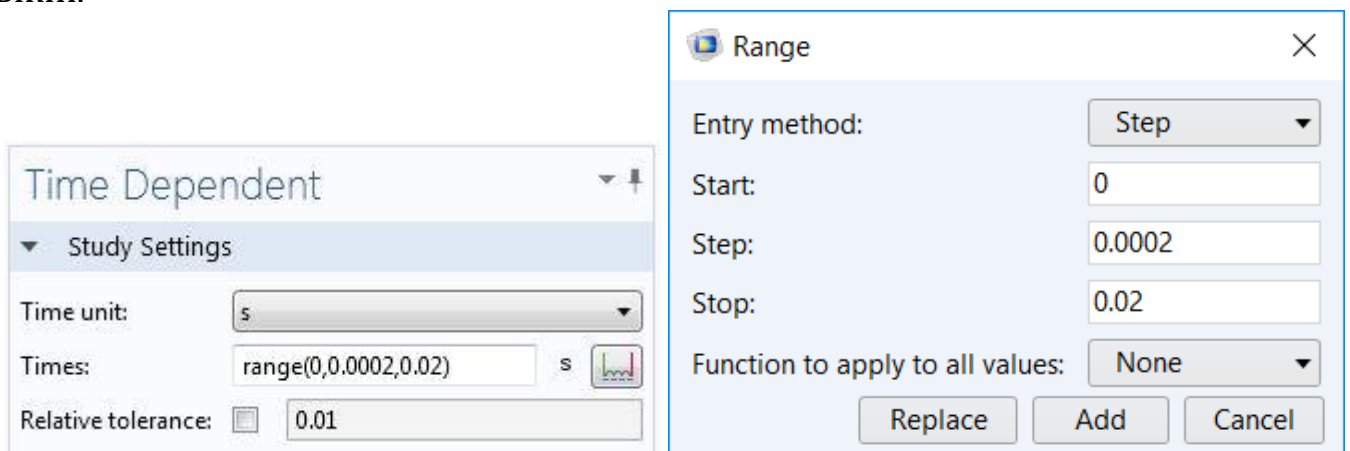


Рис.36 – Задання параметрів **Time Dependent** у вкладці **Study1**

Студент може самостійно варіювати значення кількості кроків розрахунку і час розрахунку. Це вплине на параметри відеоролика. Ротор двополюсного АД один оберт робить за 0,02 с, а ротор шестиполюсного АД один оберт робить за 0,06 с.

У відповідності з формулою період одного оберту ротора двополюсного АД:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50 \text{ Гц}} = 0,02 \text{ с}$$



18. Для розрахунку моделі натиснути На панелі інструментів «**Compute**»

19. У вкладці **Model Builder** додати **Contour1**, натиснувши правою кнопкою мишки на **Magnetic flux density**

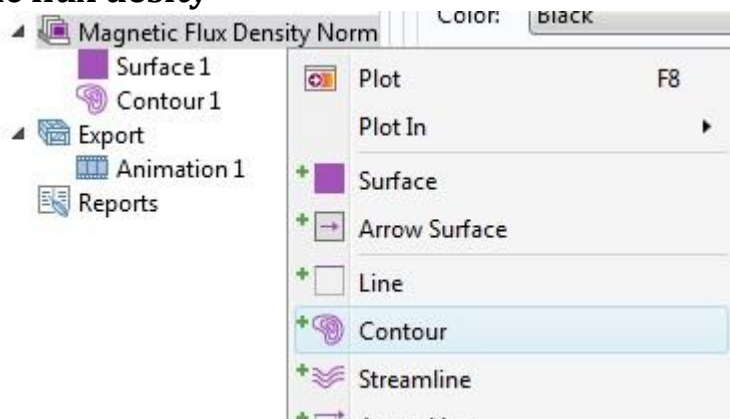


Рис. 37 – Додавання вкладки **Contour1** у вкладці **Magnetic flux density**

Додавання контурів дає змогу подивитися на розподіл різних величин в трансформаторі. За замовчуванням у **Contour 1** відображає розподіл магнітної індукції. Поле **Expression** відповідає за те, розподіл якої величини буде відображатись.

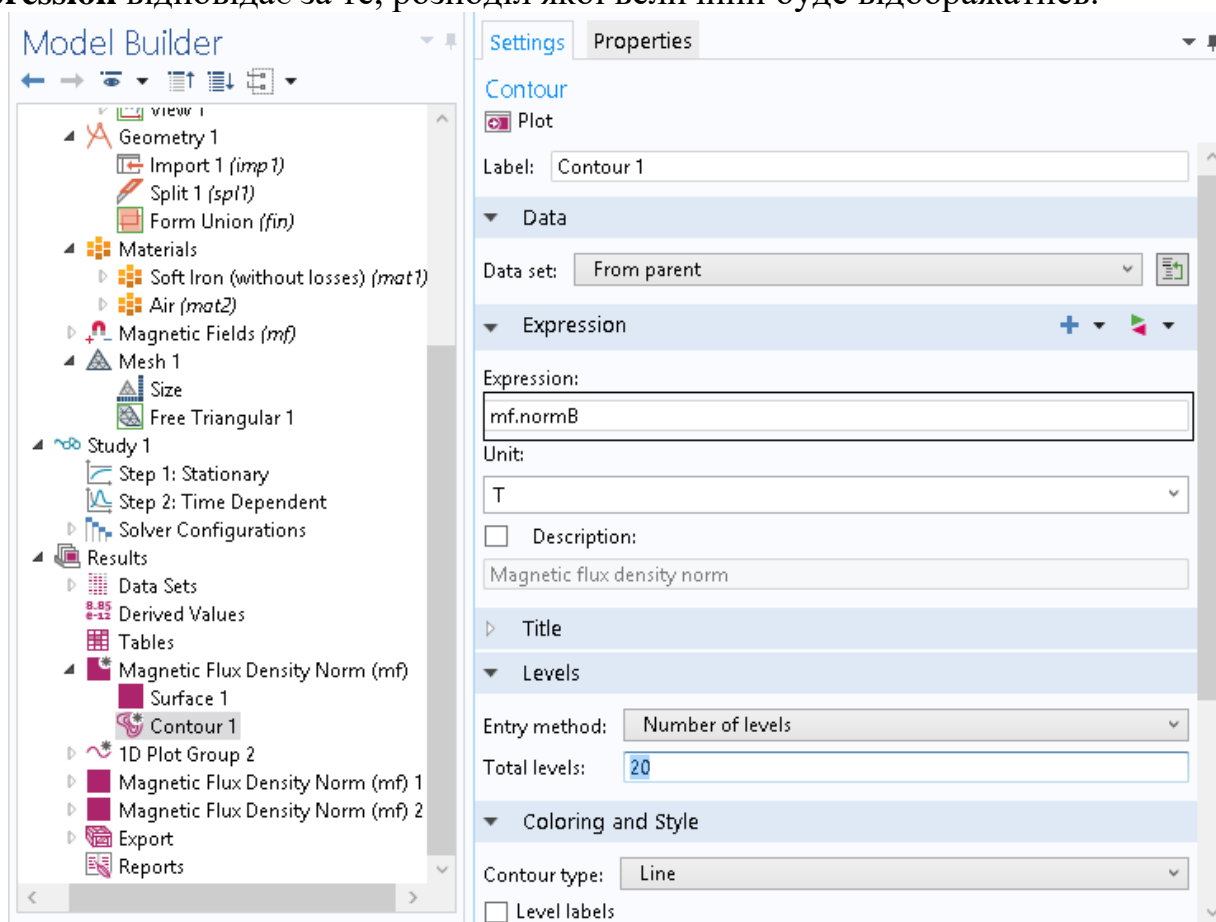


Рис. 38 – Параметри **Contour 1**

20. Для виводу результатів, додати необхідні параметри, як показано у прикладі і клікнути **Plot**.

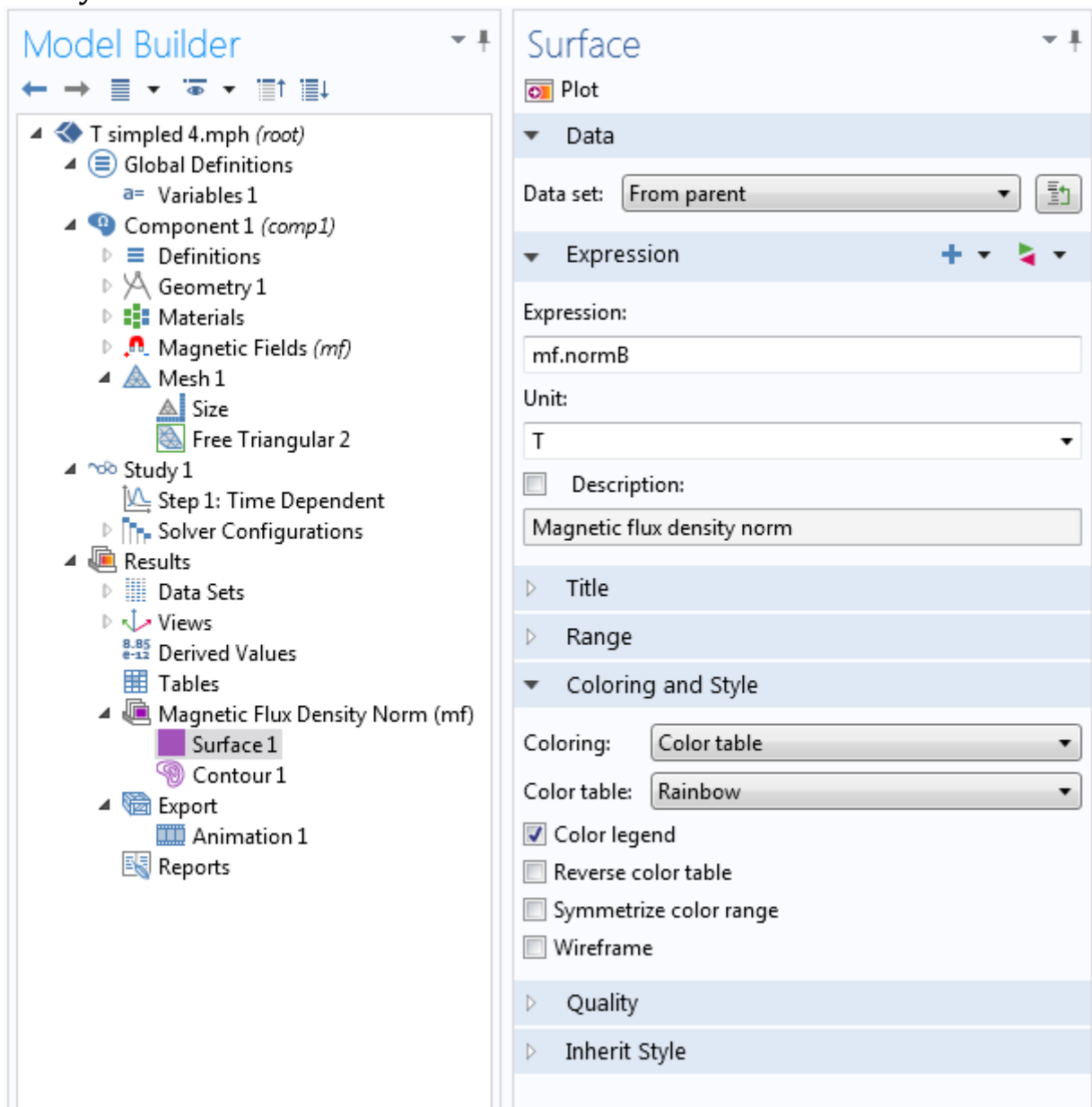


Рис. 39 – Задання параметрів у вкладці **Surface1**

21. Для того, щоб повніше відобразити процеси в трансформаторі слід показати розподіл ще декількох величин. Для цього треба зробити копію результату розрахунку для цього треба зробити **Duplicate** з **Magnetic Flux Density Norm (mf)**:

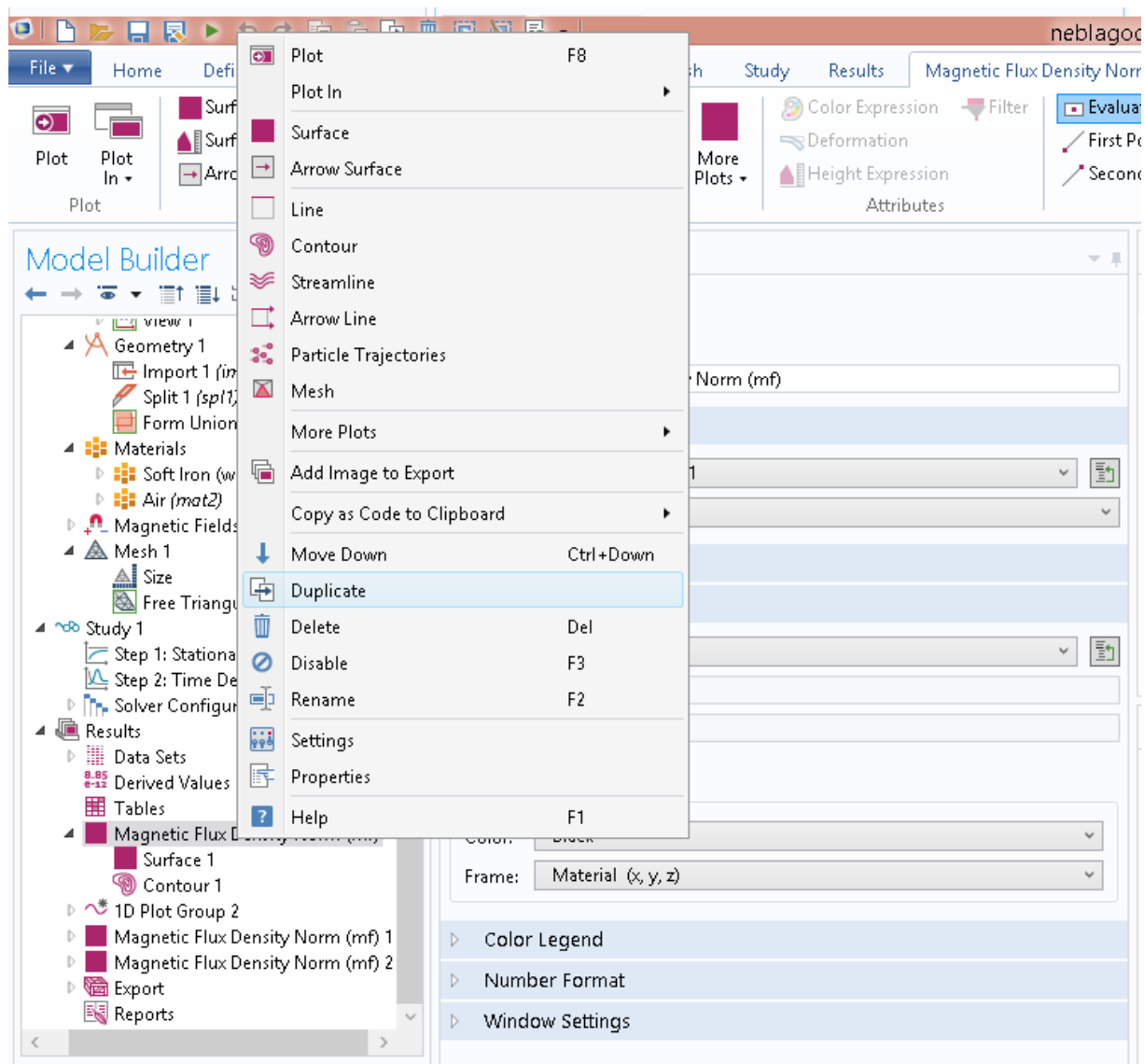


Рис. 40 – Створення копії **Magnetic Flux Density Norm (mf)**.

У копії результату треба змінити значення в полі **Expression** для **Contour 1** на **Az**:

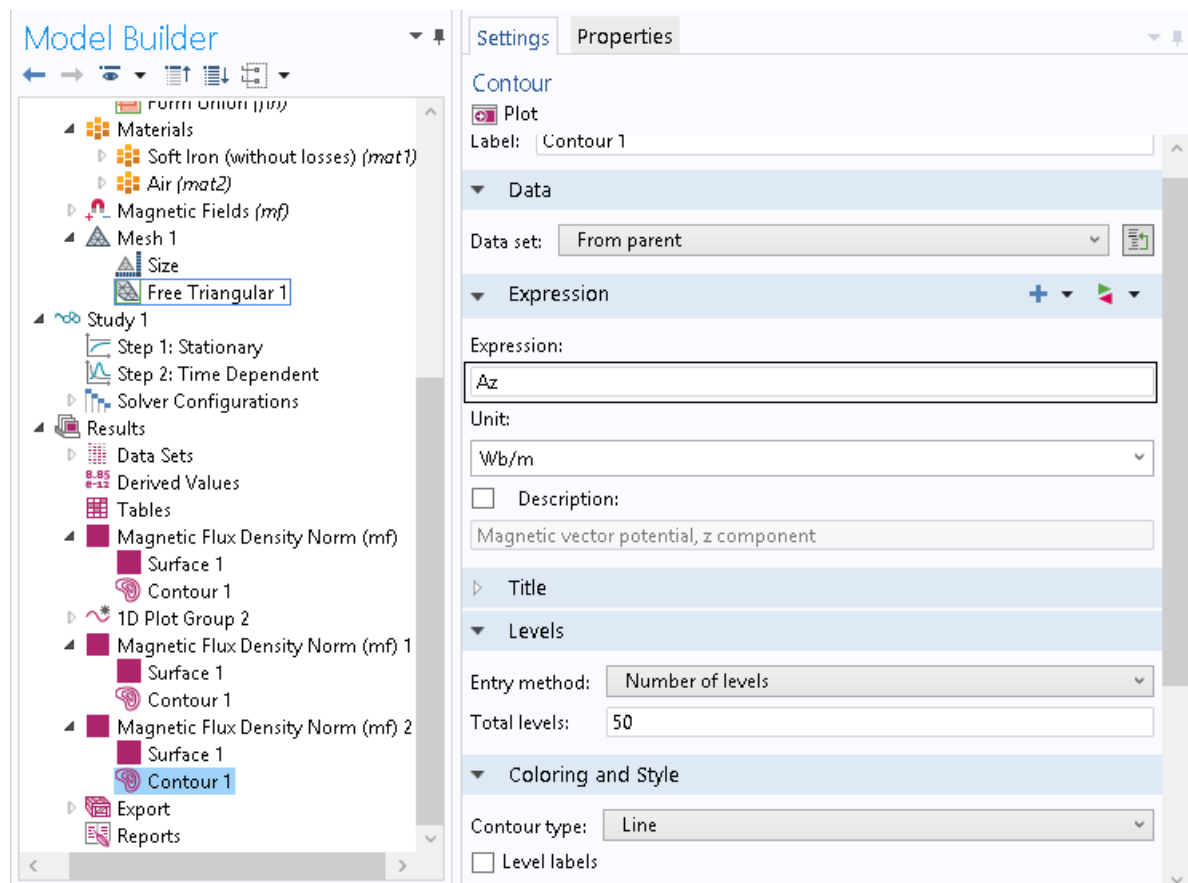


Рис. 41 – Замінюємо **mf.normB** на **Az**

Таким чином ми отримаємо розподіл векторного магнітного потенціалу. Тепер треба зробити ще одну копію и там у полях **Expression** для **Surface 1** і **Contour 1** записати значення **mf.Jz**:

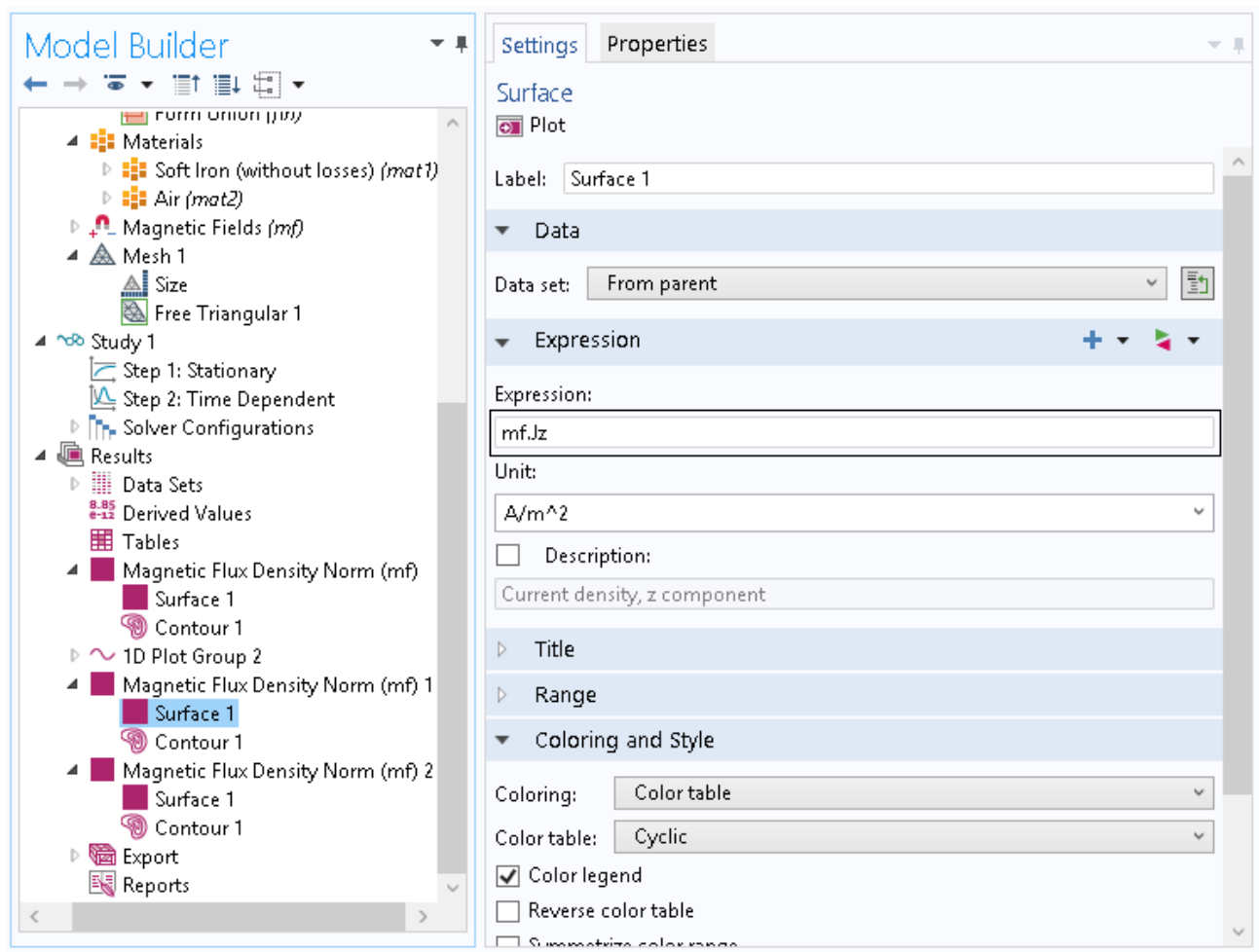


Рис. 42 – Замінюємо **mf.normB** на **mf.Jz** в **Surface 1**

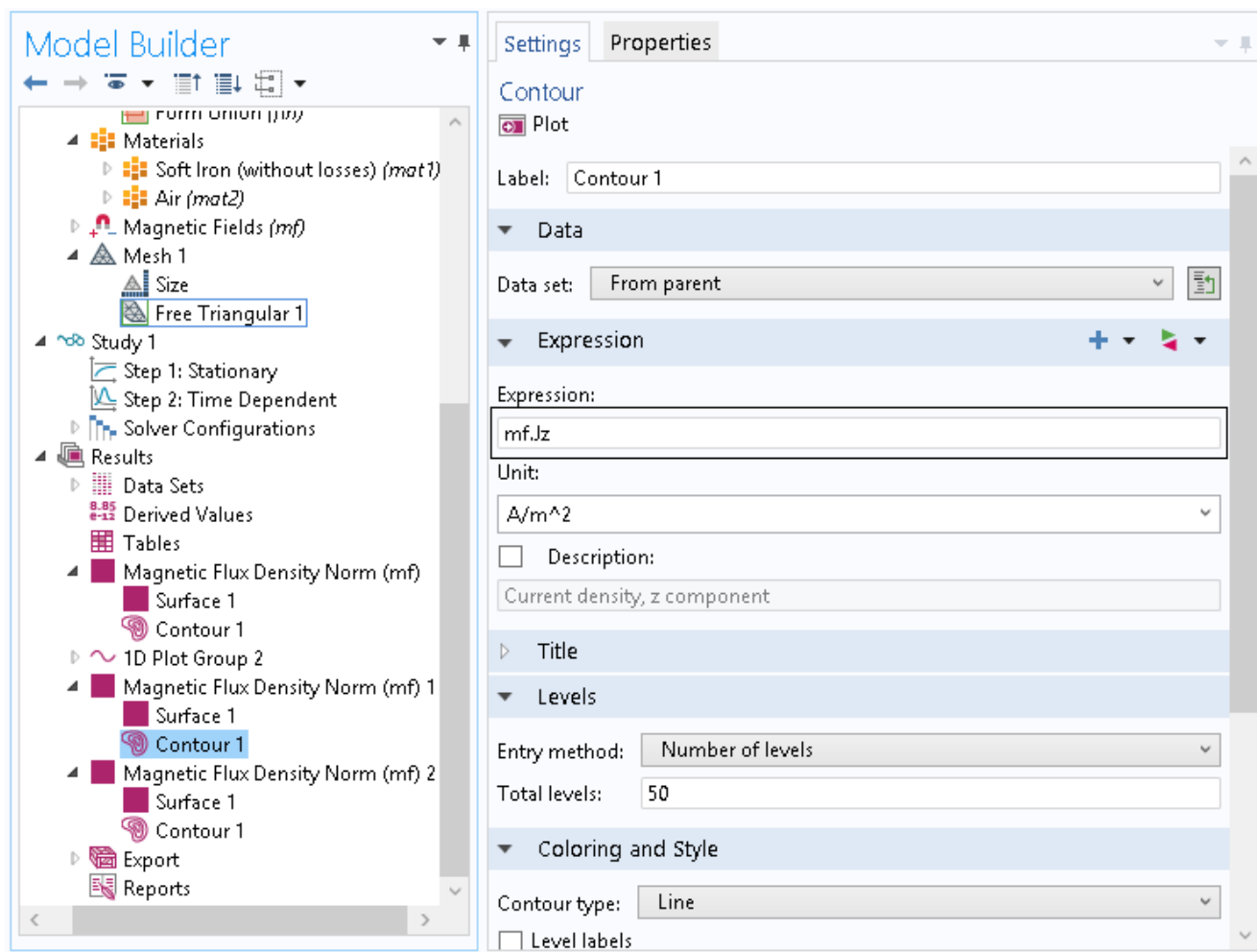


Рис. 43 – Замінюємо **mf.normB** на **mf.Jz** в **Contour 1**

Отримана картина буде відповідати розподілу густини струму. Для покращення зображення величин в контурі необхідно змінити значення в полі Total level із 20 на 50:

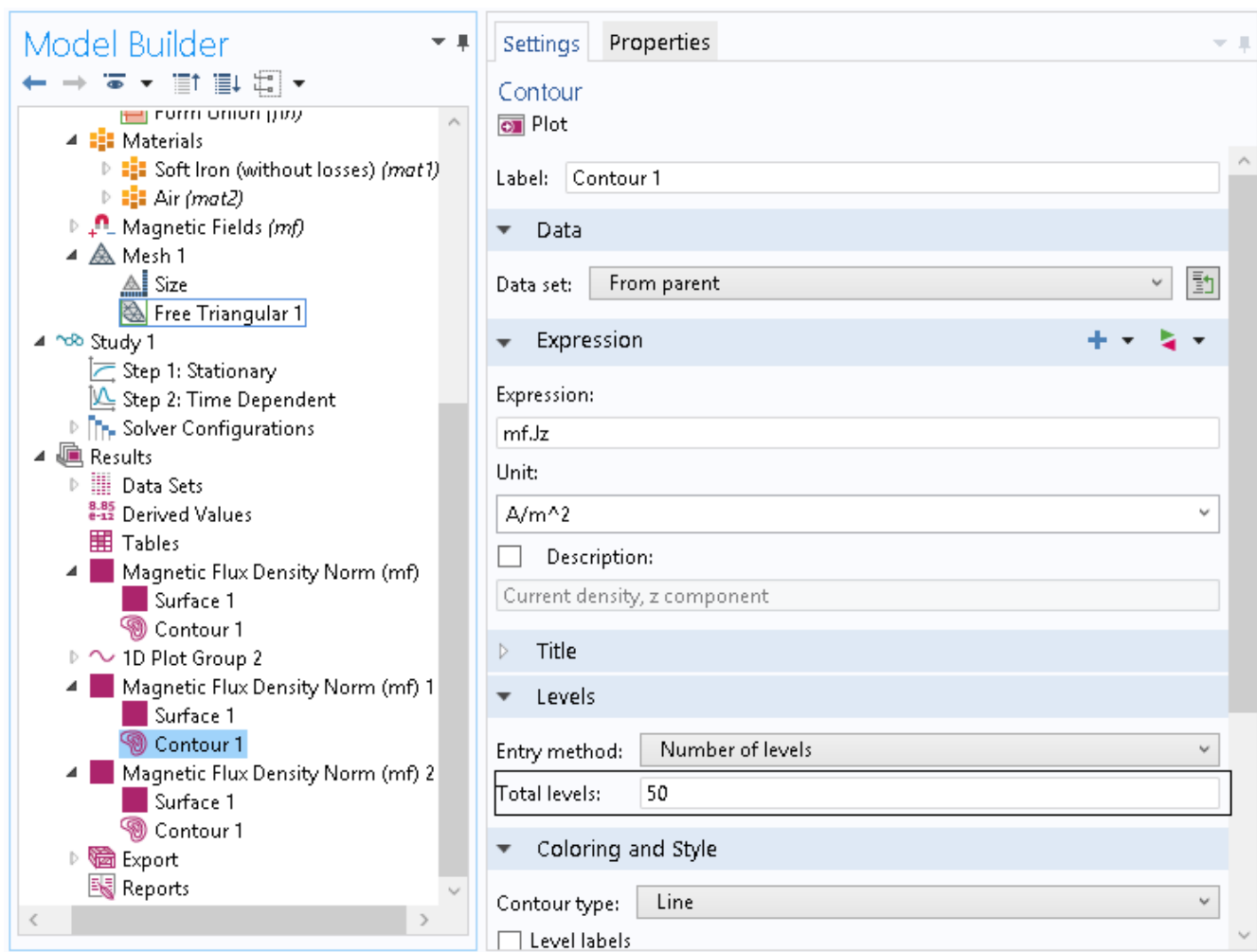


Рис. 44 – змінюємо кількість ліній з 20 на 50

22. Для експорту анімації фізичного процесу, що відображається в часовій зміні розподілу магнітного поля і індукції в активних частинах трифазного трансформатора необхідно у вкладці «**Export**» додати «**Animation**» та натиснути «**Export**»

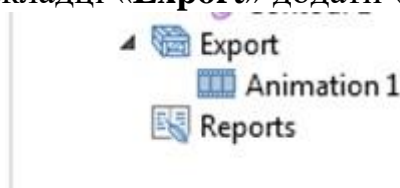


Рис. 45 – Додавання вкладки **Animation**

Необхідно створити 3 відеоролики:

- 1) зміна в часі розподілу в розрахунковій області магнітної індукції **mf.normB** і контурів **Az**;
- 2) зміна в часі розподілу в розрахунковій області струмів в обмотках **mf.Jz** і контурів **Az**;
- 3) зміна в часі розподілу в розрахунковій області векторного магнітного потенціалу **Az** і контурів **Az**;

23. Задання параметрів анімації наведені в комп'ютерному практикумі “Математичне моделювання асинхронного двигуна”.

24. Критерії правильності виконання лабораторної роботи:

- 1) Силкові лінії магнітного поля проходять вздовж стержнів трансформатора.
- 2) Максимальні значення індукції в межах 2-2.5 Тл (може відрізнятись залежно від варіанта, але не більше 3 Тл).
- 3) Максимальні значення індукції рівномірно розповсюджені в стержнях і ядрах.

25. Якщо, зробивши усі вище описані кроки, при спробі розрахувати виникає помилка в розрахунку, то в програмі слід спробувати наступні дії:

- 1) Змінювати число ітерацій в **Fully Coupled 1** для **Time-Dependent Solver 1**, що знаходиться в **Solver Configurations**.

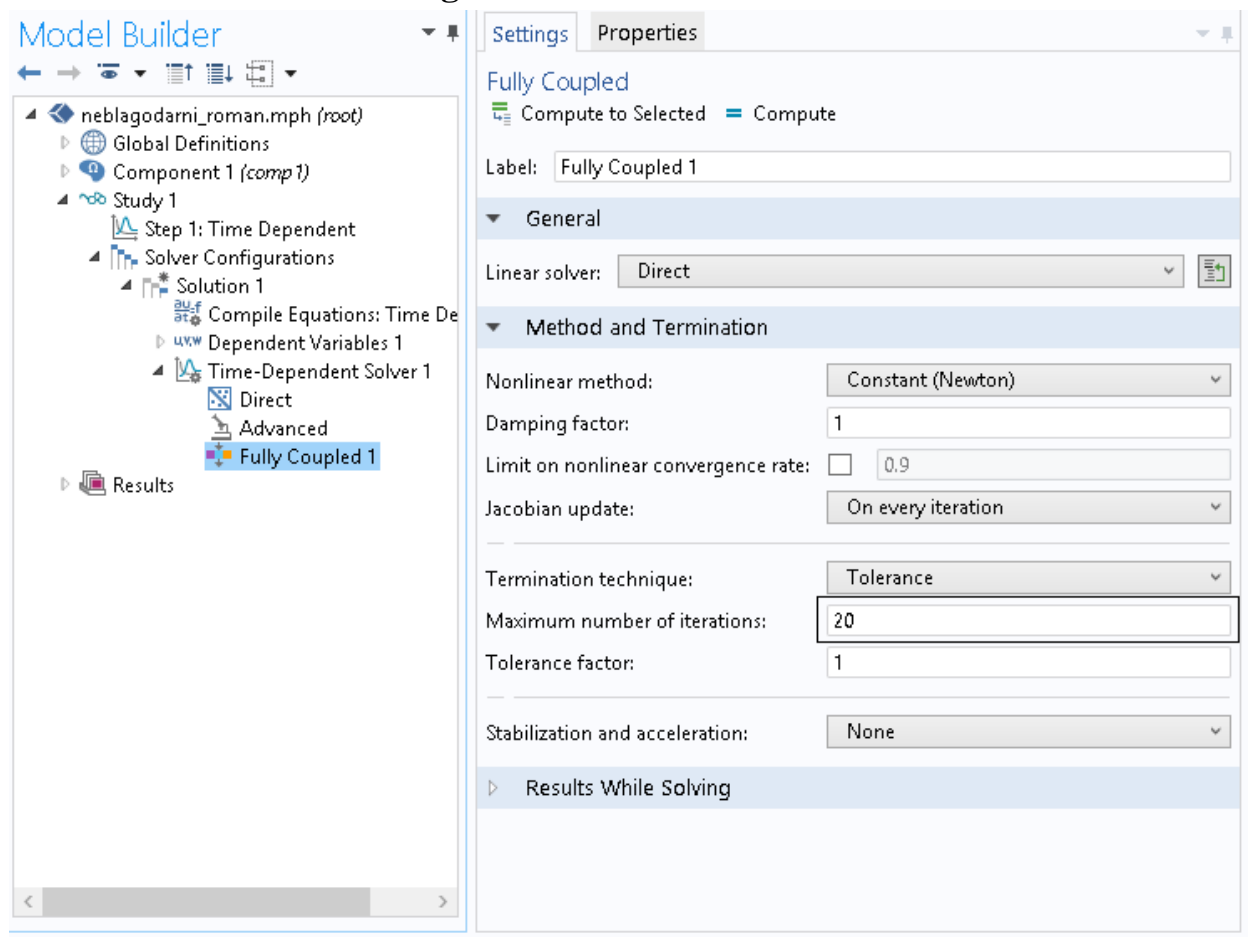


Рис. 46 – Змінюємо кількість ітерацій в **Fully Coupled 1**

2) Змінювати якість сітки в **Mesh 1** -> **Size**

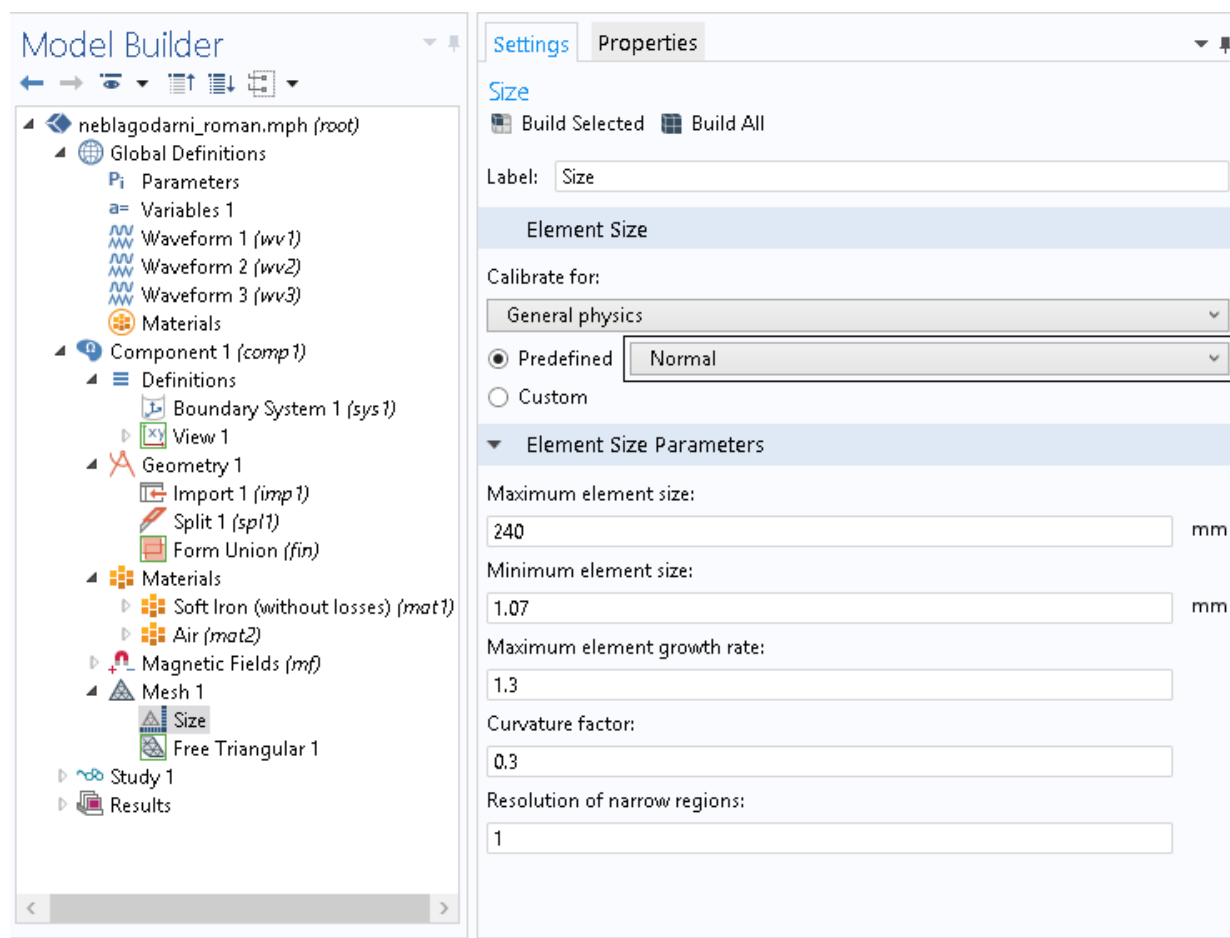


Рис. 47 – Змінюємо якість сітки **Mesh 1**

- 3) Змінювати характер кроків з Free на Strict чи Intermediate в **Time-Dependent Solver 1**, що знаходиться в **Solver Configurations**.

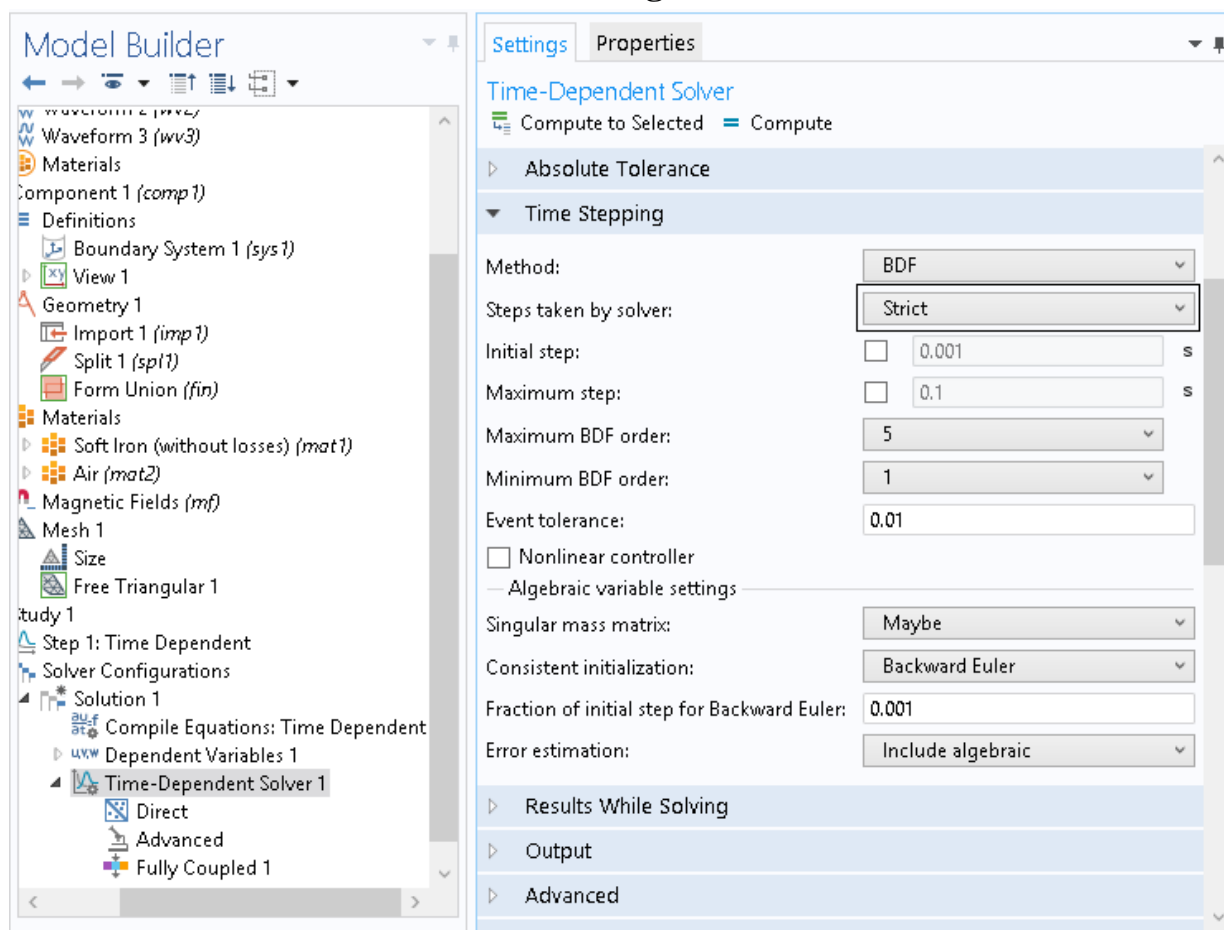


Рис. 48 – змінюємо характер кроків для **Time-Dependent Solver 1**

- 4) Змінювати метод розрахунку в **Time-Dependent Solver 1**, що знаходиться в **Solver Configurations**.

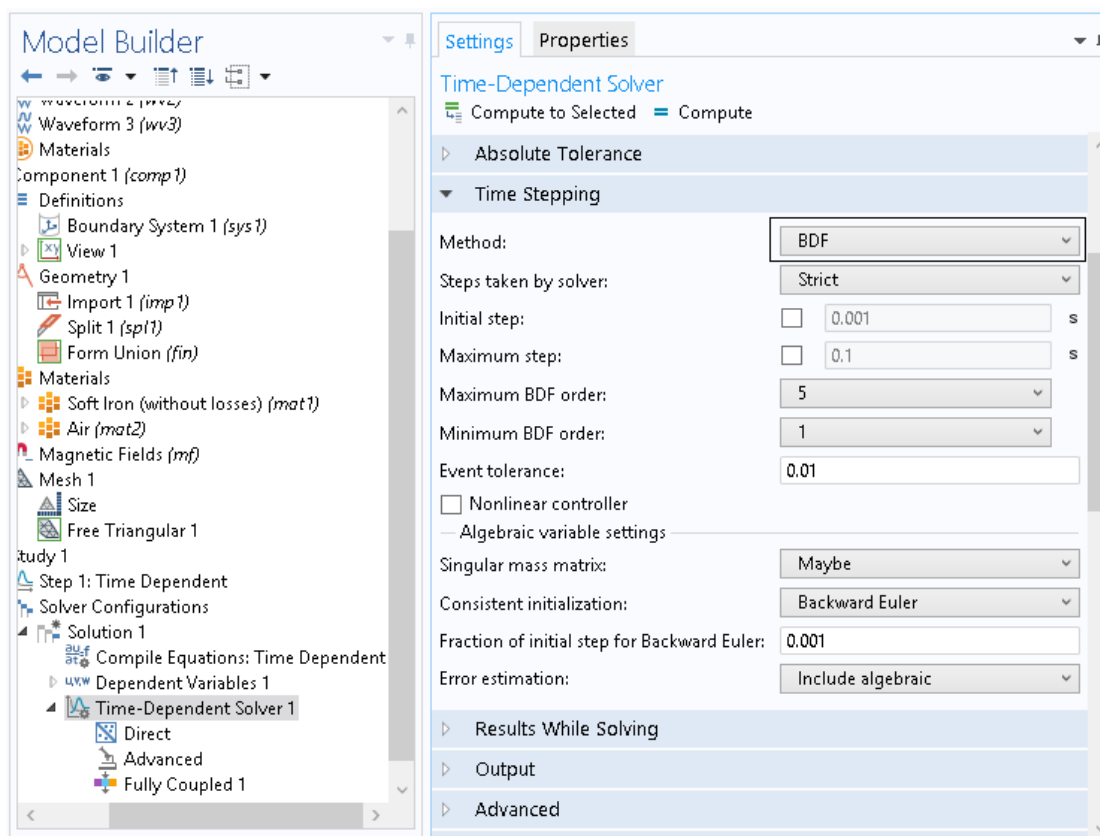


Рис. 49 – Змінюємо метод розрахунку для **Time-Dependent Solver 1**

26. Налаштування відео також є важливою частиною лабораторної роботи, оскільки воно відображає результат усієї проробленої роботи. Тому декілька слів про відео:

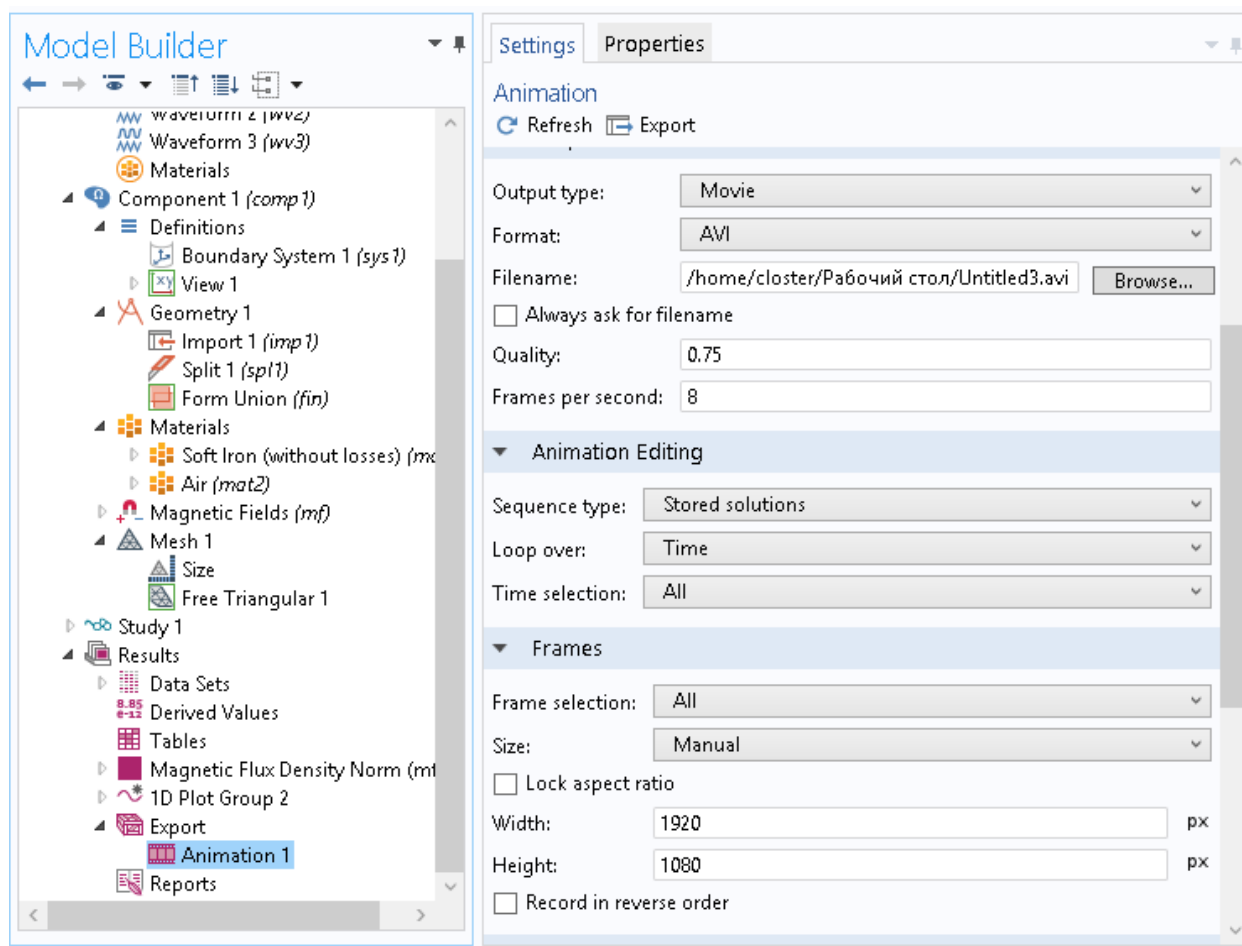


Рис. 50 – Налаштування відео

У полі **Format** слід обрати **AVI**, це поле відповідає за те, то ми отримаємо після експорту. У даному разі це буде відео формату .avi.

У полі **Quality** можна ввести число від **0** до **1**, що відповідає за якість. Чим більше число в цьому полі, тим краща якість, але і час експортування файлу більше.

Поле **Frames per second** - це кількість кадрів за секунду і відповідає за швидкість відео.

Поля **Width** і **Height** відповідають за роздільність відео.

Комп'ютерний практикум №6

Математичне моделювання електромагнітного поля короткозамкненого асинхронного двигуна в програмі Comsol Multiphysics (4 години)

Мета роботи. Здобути навички роботи з сучасним програмним комплексом Comsol Multiphysics на прикладі математичного моделювання електромагнітного поля короткозамкненого асинхронного двигуна.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Створити коректну математичну модель асинхронного двигуна:
 - накреслити поперечний переріз активної частини асинхронного двигуна в програмі Autocad;
 - імпортувати геометрію асинхронного двигуна в програму Comsol;
 - задати параметри елементів асинхронного двигуна;
 - задати параметри часозалежної задачі;
 - задати параметри виведення результатів розрахунку.
2. Розрахувати та візуалізувати електромагнітне поле короткозамкненого асинхронного двигуна.
3. Продемонструвати 3 відеоролики:
 - 1) зміна в часі розподілу в розрахунковій області магнітної індукції $\mathbf{mf.normB}$ і контурів \mathbf{Az} ;
 - 2) зміна в часі розподілу в розрахунковій області струмів в обмотках $\mathbf{mf.Jz}$ і контурів \mathbf{Az} ;
 - 3) зміна в часі розподілу в розрахунковій області векторного магнітного потенціалу \mathbf{Az} і контурів \mathbf{Az} ;

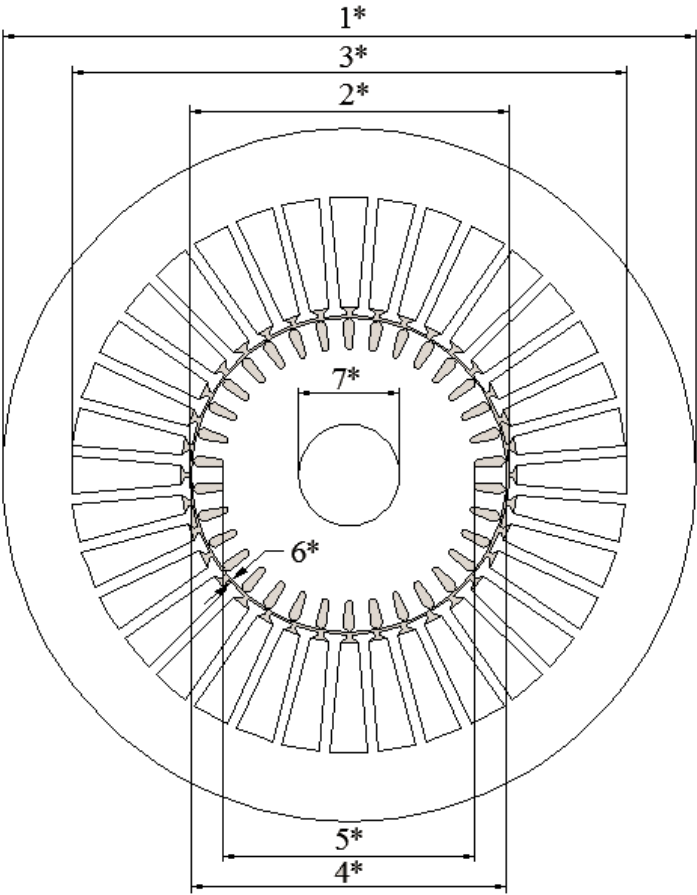
Особливості процесу моделювання:

1. Варіант асинхронного двигуна для моделювання вибирається таким, який раніше студент спроектував в курсовому проекті при вивченні дисципліни "Основи автоматизованого проектування електричних машин". Можна також обрати інший варіант з Таблиці 4.
2. Вибираємо одношарову обмотку.
3. Геометричні розміри пазів статора і ротора студент вибирає самостійно. Ширина зубців статора і ротора повинна бути однаковою.
4. Матеріал обмоток статора необхідно задавати як повітря. Це пояснюється тим, що обмотка статора зроблена з великої сукупності провідників, а не з масивного об'єму міді. Тому змінне магнітне поле не індукує вихрові струми в обмотці.

5. Матеріал обмоток ротора – мідь.
6. Немає необхідності задавати густину струму в обмотці ротора. Густина струму в обмотці ротора створюється як наслідок в результаті індукування ЕРС.
7. Розрахунок математичної моделі здійснюється для режиму номінального навантаження.
8. Пази на статорі АД мають бути відкритими або напіввідкритими. Однак в АД повинно бути 3 лінії, що проходять: по поверхні статора, по поверхні ротора, по середині повітряного проміжку. На цих лініях будуть визначатися розподіли тензора магнітного натягу і магнітної індукції.

Таблиця 4 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №6. Моделювання асинхронного двигуна

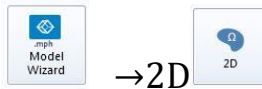
Варіант	m	p	Z1	q	Z2	D1_зовн	D1_внутр	3*	δ, мм	D2_зовн	5*	k_ярма	D_вала	J ₁ , ×10 ⁶ А/м ²	μ _{Fe}
1	3	1	54	9	33	260	119,6	156,0	2	115,6	69	0,6	28	4,00	800
2	3	1	18	3	51	230	105,8	149,5	0,8	104,2	68	0,65	27	4,15	900
3	3	1	24	4	15	200	92,0	140,0	1	90,0	63	0,7	25	4,30	1000
4	3	1	30	5	21	500	230,0	375,0	1,2	227,6	171	0,75	68	4,45	1100
5	3	2	36	3	28	470	216,2	376,0	1,5	213,2	171	0,8	68	4,60	1200
6	3	2	24	2	33	440	202,4	264,0	1,7	199,0	119	0,6	48	4,75	1300
7	3	2	36	3	23	410	188,6	266,5	2	184,6	120	0,65	48	4,90	1400
8	3	4	48	2	34	380	174,8	266,0	0,8	173,2	121	0,7	48	5,05	1500
9	3	3	36	2	46	350	161,0	262,5	1	159,0	119	0,75	48	5,20	1600
10	3	1	54	9	35	320	147,2	256,0	1,2	144,8	116	0,8	46	5,35	800
11	3	1	18	3	51	290	133,4	174,0	1,5	130,4	78	0,6	31	5,50	900
12	3	1	24	4	16	260	119,6	169,0	1,7	116,2	76	0,65	30	5,65	1000
13	3	1	30	5	21	230	105,8	161,0	2	101,8	71	0,7	29	5,80	1100
14	3	3	18	1	27	200	92,0	150,0	0,8	90,4	68	0,75	27	5,95	1200
15	3	2	24	2	15	500	230,0	400,0	1	228,0	182	0,8	73	6,10	1300
16	3	5	30	1	23	470	216,2	282,0	1,2	213,8	128	0,6	51	6,25	1400
17	3	3	36	2	29	440	202,4	286,0	1,5	199,4	130	0,65	52	6,40	1500
18	3	4	24	1	33	410	188,6	287,0	1,7	185,2	130	0,7	52	6,55	1600
19	3	1	36	6	22	380	174,8	285,0	2	170,8	128	0,75	51	4,00	800
20	3	1	48	8	33	350	161,0	280,0	0,8	159,4	128	0,8	51	4,15	900
21	3	1	36	6	47	320	147,2	192,0	1	145,2	87	0,6	35	4,30	1000
22	3	1	54	9	34	290	133,4	188,5	1,2	131,0	85	0,65	34	4,45	1100
23	3	3	18	1	53	500	230,0	350,0	1,5	227,0	159	0,7	64	4,60	1200
24	3	2	24	2	15	470	216,2	352,5	1,7	212,8	160	0,75	64	4,75	1300
25	3	5	30	1	22	440	202,4	352,0	2	198,4	159	0,8	63	4,90	1400
26	3	3	36	2	27	410	188,6	246,0	0,8	187,0	112	0,6	45	5,05	1500
27	3	4	24	1	33	380	174,8	247,0	1	172,8	112	0,65	45	5,20	1600
28	3	1	36	6	23	350	161,0	245,0	1,2	158,6	111	0,7	44	5,35	800
29	3	1	48	8	34	320	147,2	240,0	1,5	144,2	108	0,75	43	5,50	900
30	3	1	36	6	45	290	133,4	232,0	1,7	130,0	104	0,8	42		

Позначення:		
	<p>m - кількість фаз; p - кількість пар полюсів; Z1- кількість пазів статора; q - число пазів на полюс і фазу; J1 - густина струму в обмотці статора; μ - магнітна проникність магнітопровода статора. Розміри в табл. 4 наведені в мм.</p>	
	$D1_{\text{ярма_внутр}} = k_{\text{ярма}} \cdot D1_{\text{зовн}}$	
	$D2_{\text{ярма_зовн}} = k_{\text{ярма}} \cdot D2_{\text{зовн}}$	
1*	зовнішній діаметр магнітопровода статора (D1_зовн);	
2*	внутрішній діаметр розточки статора (D1_внутр);	
3*	діаметр, що визначає глибину пазів статора (D1_ярма_внутр);	
4*	зовнішній діаметр ротора (D2_наруж);	
5*	діаметр, що визначає глибину пазів ротора (D2_ярма_зовн);	
6*	товщина повітряного проміжку δ, мм;	
7*	діаметр валу ротора (D_валу);	Рис. 40 – Ескіз асинхронного двигуна

Алгоритм побудови моделі асинхронного двигуна

1. Побудова починається з вибору геометрії 2D (не вибирати вісесиметричну):
Відкрити Comsol Multiphysics (створити новий *.mph файл)

File→New→Model Wizard



→2D

2. Вибрати фізику **Magnetic fields (mf)** у вкладці AC/DC, додати (add) вибрану фізику і натиснути **Done**



Рис.41 – Вибір фізики математичної моделі

3. Для подальшого зручного створення моделі в програмі Comsol слід розмістити центр валу в центрі координат в моделі AutoCAD. Також необхідно виставити в налаштуваннях одиниці виміру – метри і будувати за заданим варіантом креслення у метрах.

Після цього – зберегти файл в форматі *.dxf

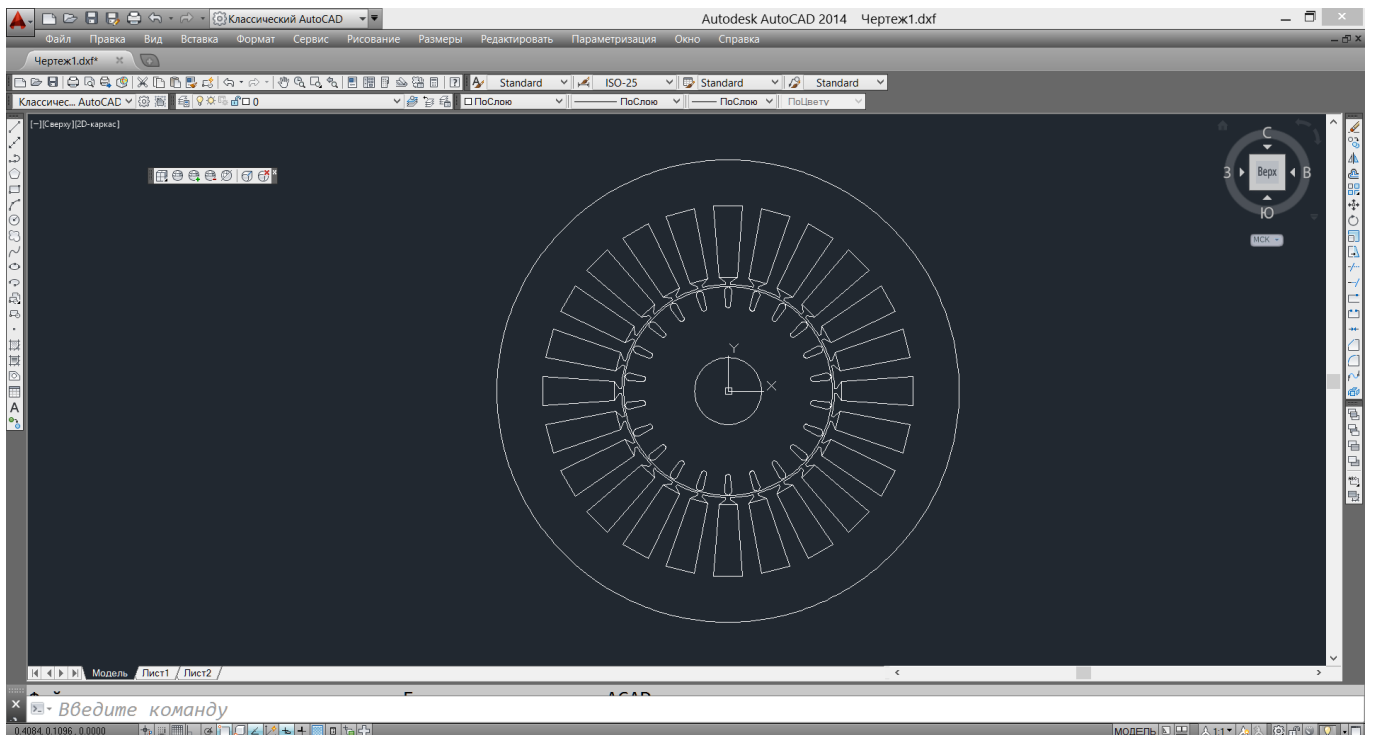


Рис.42 – Креслення АД в програмі Autocad

4. У вкладці **Model Builder** правою кнопкою мишки обрати **Global Definition** і додати **Variables**

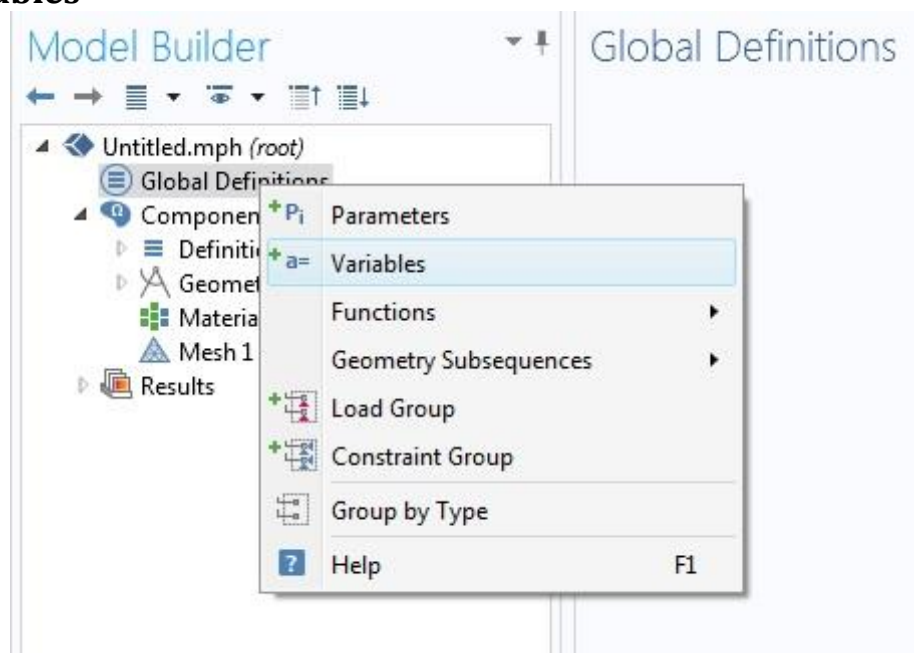


Рис.43 – Додання **Variables** у вкладці **Model Builder**

5. Щоб створити обертову трифазну систему струмів, необхідно додати наступні змінні:

Name	Expression	Unit	Description
Ja	$J1 \cdot \cos(w \cdot t)$	A/m ²	
Jb	$J1 \cdot \cos(w \cdot t + 2 \cdot \pi / 3)$	A/m ²	
Jc	$J1 \cdot \cos(w \cdot t - 2 \cdot \pi / 3)$	A/m ²	
J1	$6e6 [A/m^2]$	A/m ²	
t	1[s]	s	
f	50[Hz]	Hz	
w	$2 \cdot \pi \cdot f \cdot skovz$	1/s	
skovz	0.045		

Рис.44 – Задання струмів у вкладці **Variables**

6. У вкладці **Geometry1** додати **Import**:

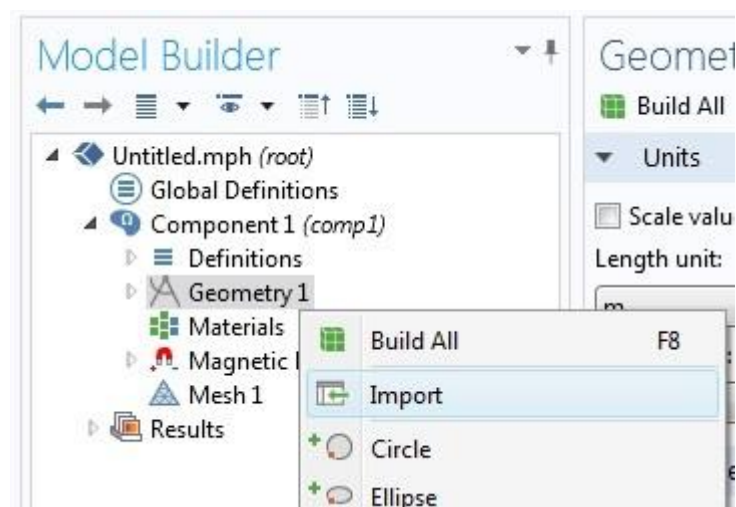


Рис.45 – Додавання вкладки **Import**

7. Відкрити файл, створений раніше у CAD-програмі

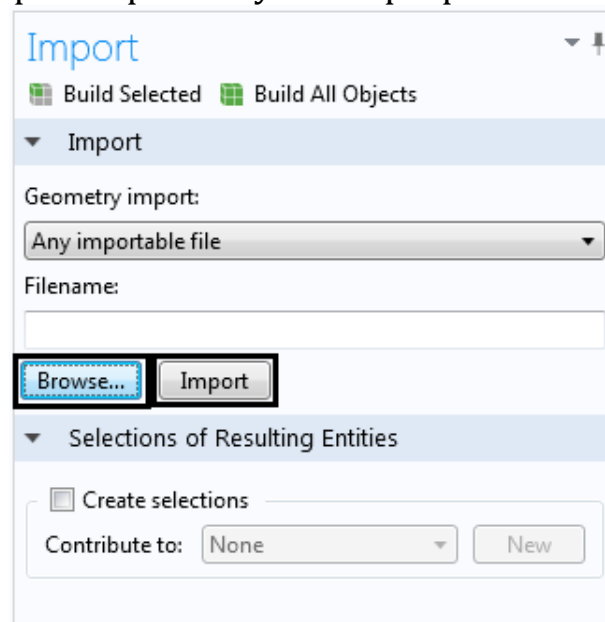



Рис.46 – Імпортування геометрії з файла

Та імпортувати його, натиснувши кнопку **Import**

8. Розбити креслення на окремі елементи за допомогою доданої вкладки **Geometry1→Conversions** → 



І активувати параметр **Split** кнопкою **ON** Active

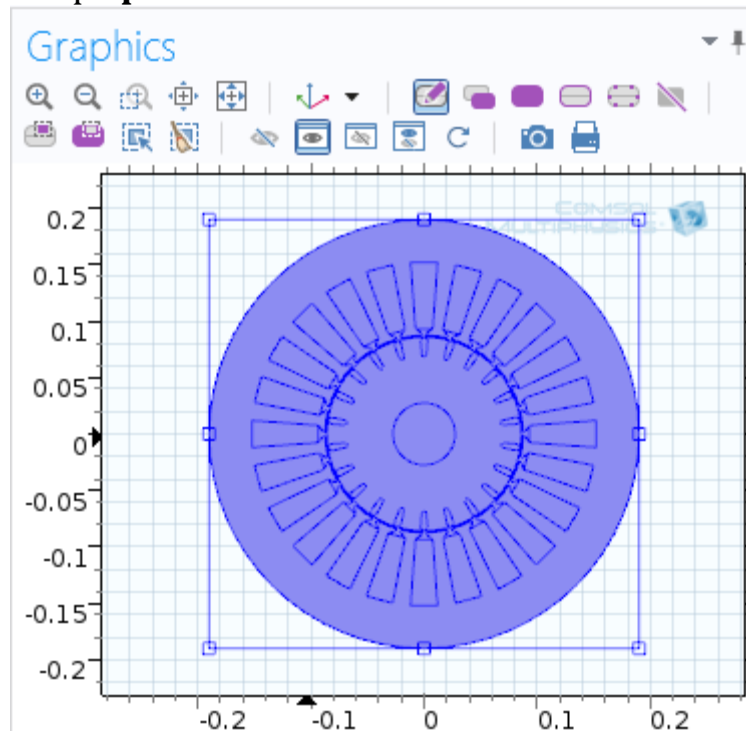


Рис.47 – Імпортована геометрія з файла

Після цього клікнути на макет креслення в полі **Graphics** щоб додати його до вкладки **Input**.

Лівою кнопкою мишки клікнути на вкладку **Geometry1** та натиснути у вікні Geometry – **Build All** (або F8)

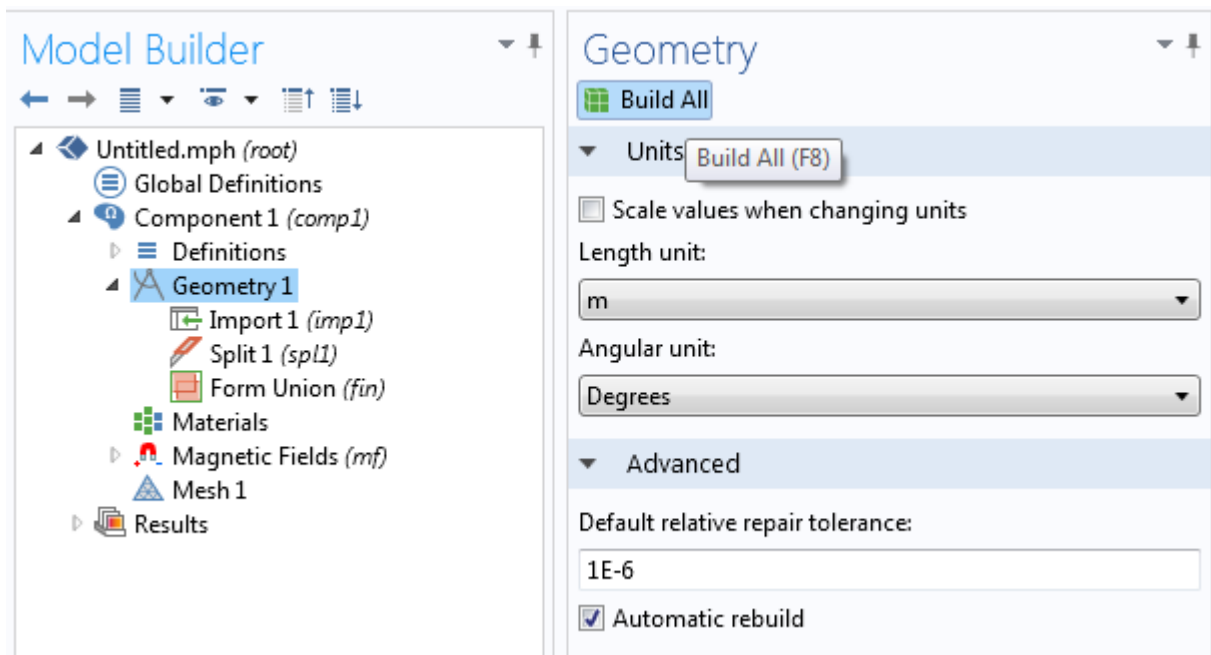


Рис.48 – Побудова всіх елементів у вкладці **Geometry1**

6. Використовуючи **Material library** у вкладці **Materials** додати матеріали: повітря і залізо. Мідь в обмотках задавати не треба, бо в даній задачі обмотки слугують як джерела поля і в них не досліджуються вихрові струми.

Для цього у вкладці **Materials** обрати **Add Material**

Та у новому вікні додати **Soft iron (without losses)** та **Air** :

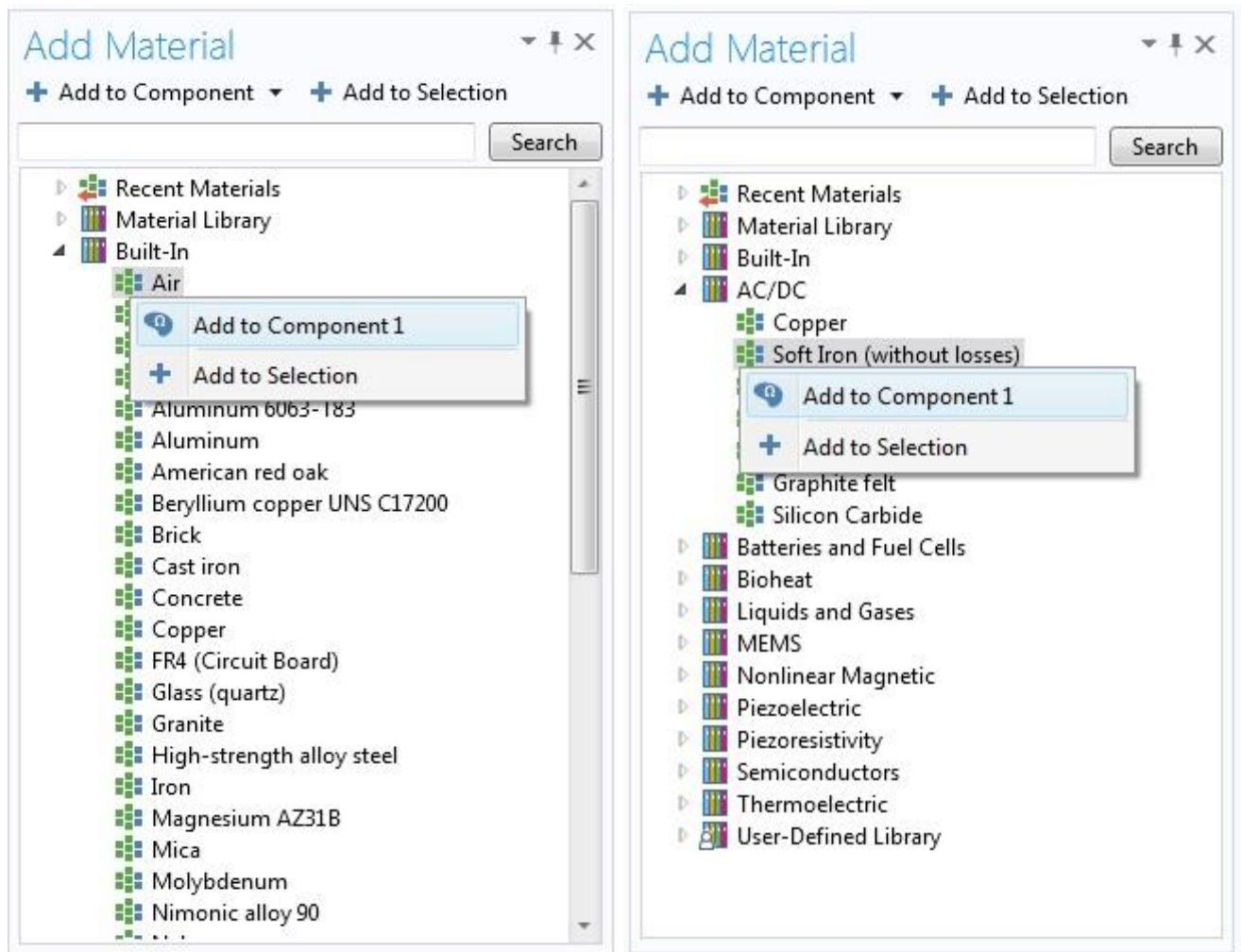


Рис.49 – Додавання матеріалів з бібліотеки матеріалів

7. Задати магнітну проникність заліза, $\mu=1000$, клікнувши на **Materials**→

► **Soft Iron (without losses) (mat1)**, та обравши вікні **Material** відповідний параметр

»	Property	Name	Value
⚠	Relative permeability	mur	1000

Рис.50 – Задання μ матеріалу

Після цього – у вікні **Graphics** обрати блоки, що відповідають магнітопроводу асинхронного двигуна.

Клікнувши на вкладку ► **Air (mat2)**, обрати блоки, що відповідають області, з магнітною проникністю повітря (в тому числі – обмотки):

8. Задати трифазну систему струмів.

Для цього, в вікні **Model Builder**, обрати **External Current Density**

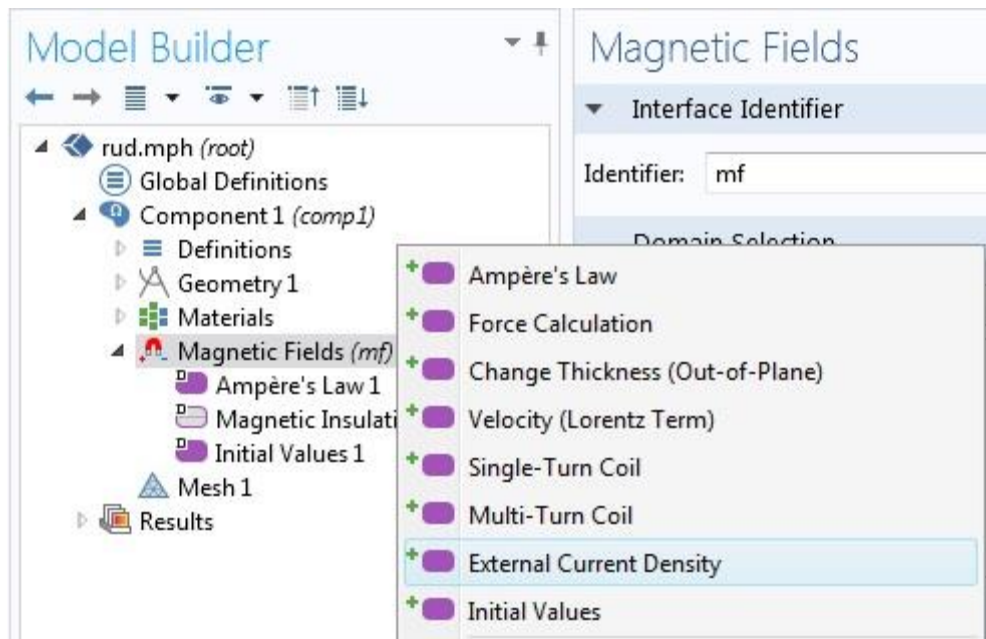


Рис.51 – Задання зовнішніх джерел густин струму

Та створити для обмоток кожної фази свій параметр **External Current Density** (6 шт.), обравши відповідну область в вікні **Graphics**.
Вибрати потрібну поверхню та прописати по осі Z густини струмів, та слідкувати за знаком, так як для фази A береться зі знаком плюс, а для X – обираємо ту ж густину струму для фази A, але з мінусом.

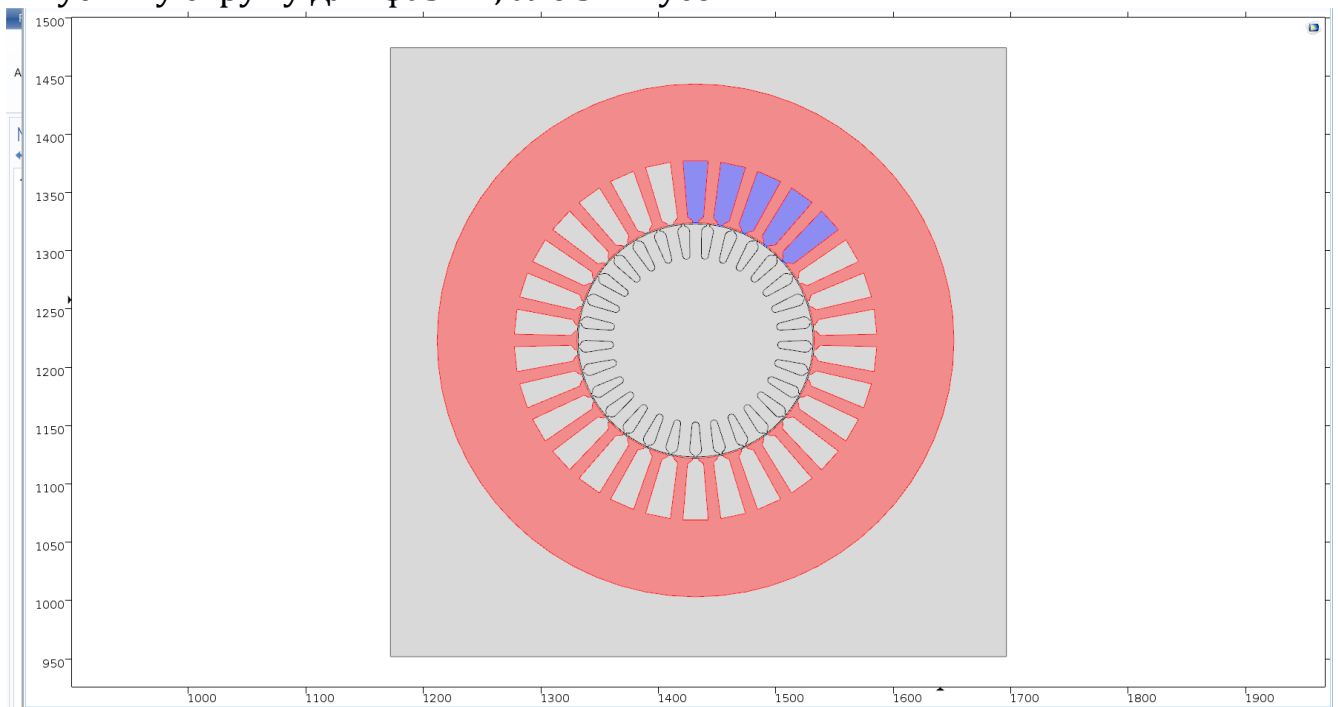


Рис.52 – Задання зовнішніх джерел густин струму
в фазних зонах обмотки статора

External Current Density

Domain Selection

Selection: Manual

ON Active

20
25
26
29

Override and Contribution

Coordinate System Selection

Coordinate system:
Global coordinate system

External Current Density

External current density:

J_e	0	x	A/m ²
	0	y	
	J_a	z	

Рис.53 – Задання зовнішніх джерел густин струму в фазних зонах обмотки статора

9. Задати матеріал обмоток ротора – мідь **Copper**.

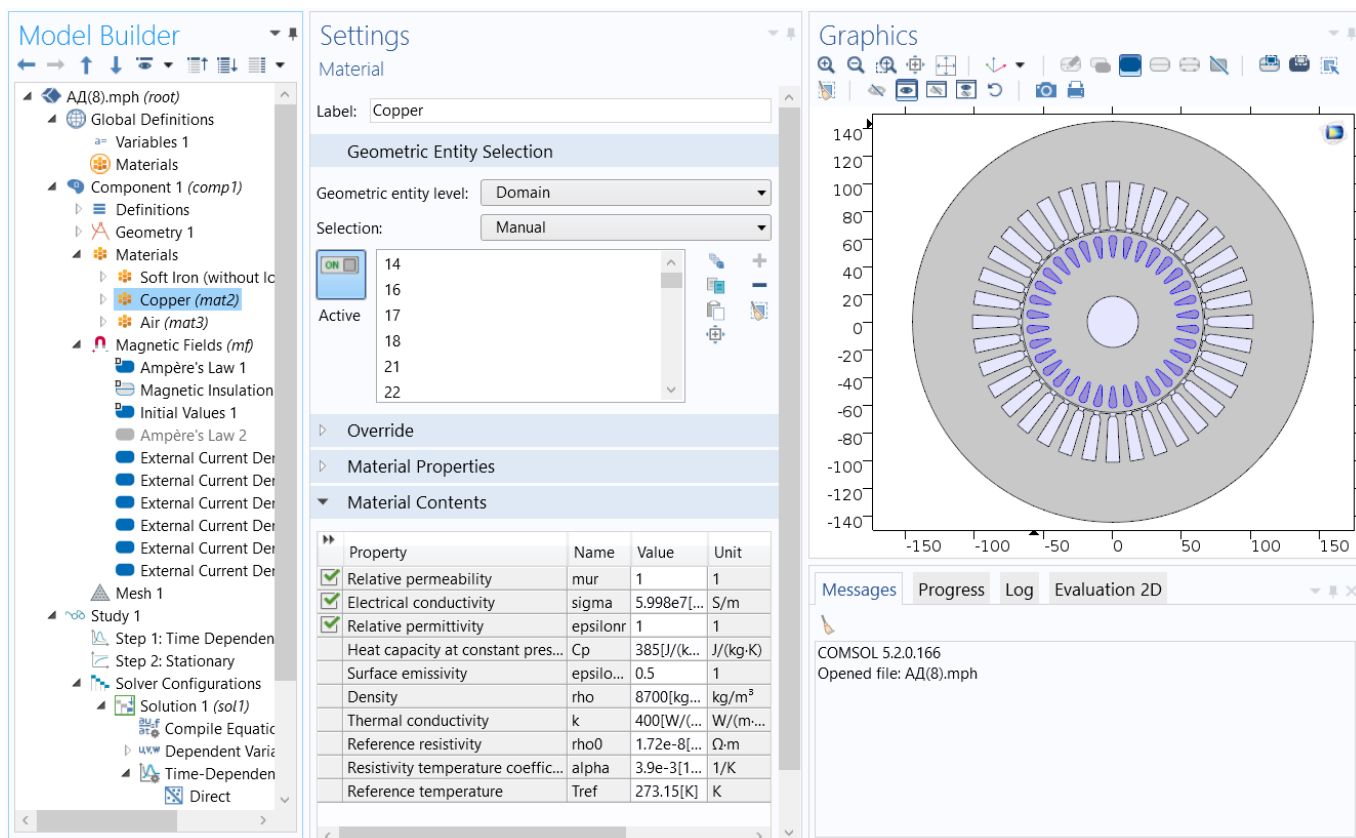


Рис.54 – Задати матеріал обмоток ротора – мідь

10. Додати **Free Triangular** у вкладці **Mesh**:



Рис.54 – Додання параметрів сітки **Free Triangular** у вкладці **Mesh**

11. Додати параметри **Time Dependent** у вкладці **Study1**, попередньо додавши **Study1** на панелі інструментів:

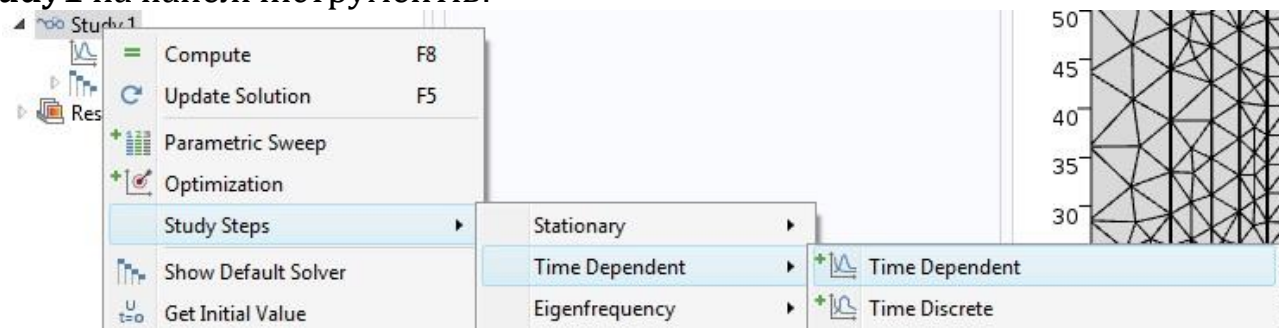


Рис.6 – Задання параметрів **Time Dependent** у вкладці **Study1**

Також – виставити необхідні параметри для **Time Dependent** у відповідному вікні.

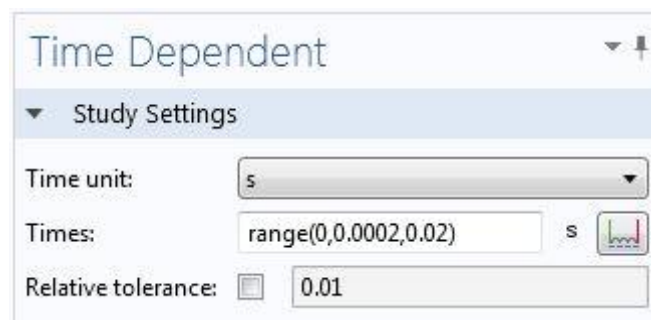


Рис.55 – Задання параметрів **Time Dependent** у вкладці **Study1**

12. На панелі інструментів розрахувати процес, обравши «**Compute**»



13. У вікні **Model Builder** додати **Contour1**, натиснувши правою кнопкою мишки на **Magnetic flux density**:

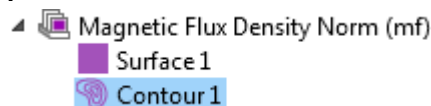


Рис.56 – Додавання вкладки **Contour1** у вкладці **Magnetic flux density**

Записати у вкладці **Surface** для відтворення силових ліній магнітного потоку:

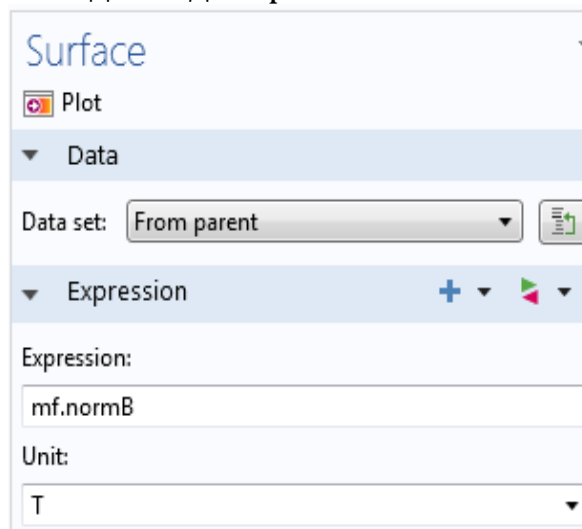


Рис.57 – Задання параметрів у вкладці **Surface**

Та у вкладці **Contour** записати:

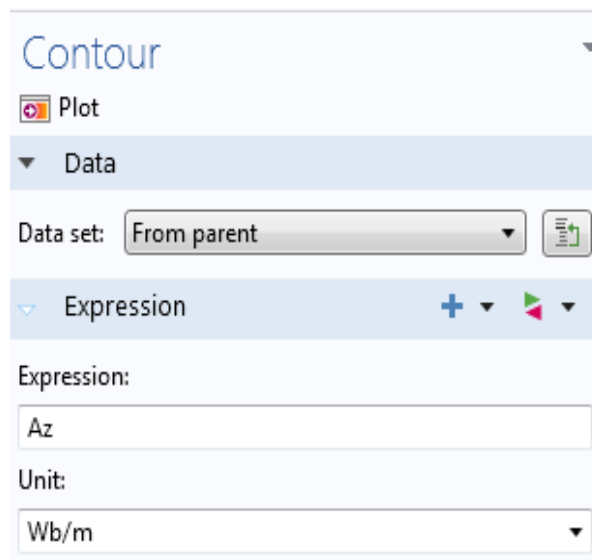


Рис.58 – Задання параметрів у вкладці **Contour**

Для виводу результатів, додати необхідні параметри, як показано у прикладі і натиснути **Plot**.

14. Для експорту анімації фізичного процесу, що відображається в часовій зміні розподілу магнітного поля і індукції в активних частинах асинхронного двигуна необхідно у вкладці «**Export**» додати **Animation** та натиснути «**Export**»

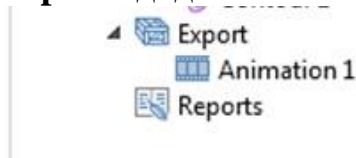


Рис.59 – Додавання вкладки **Animation**

Можна ввести корективи у вкладці «**Animation**» у відповідності з налаштуваннями якості, кількості кадрів, та роздільної здатності:

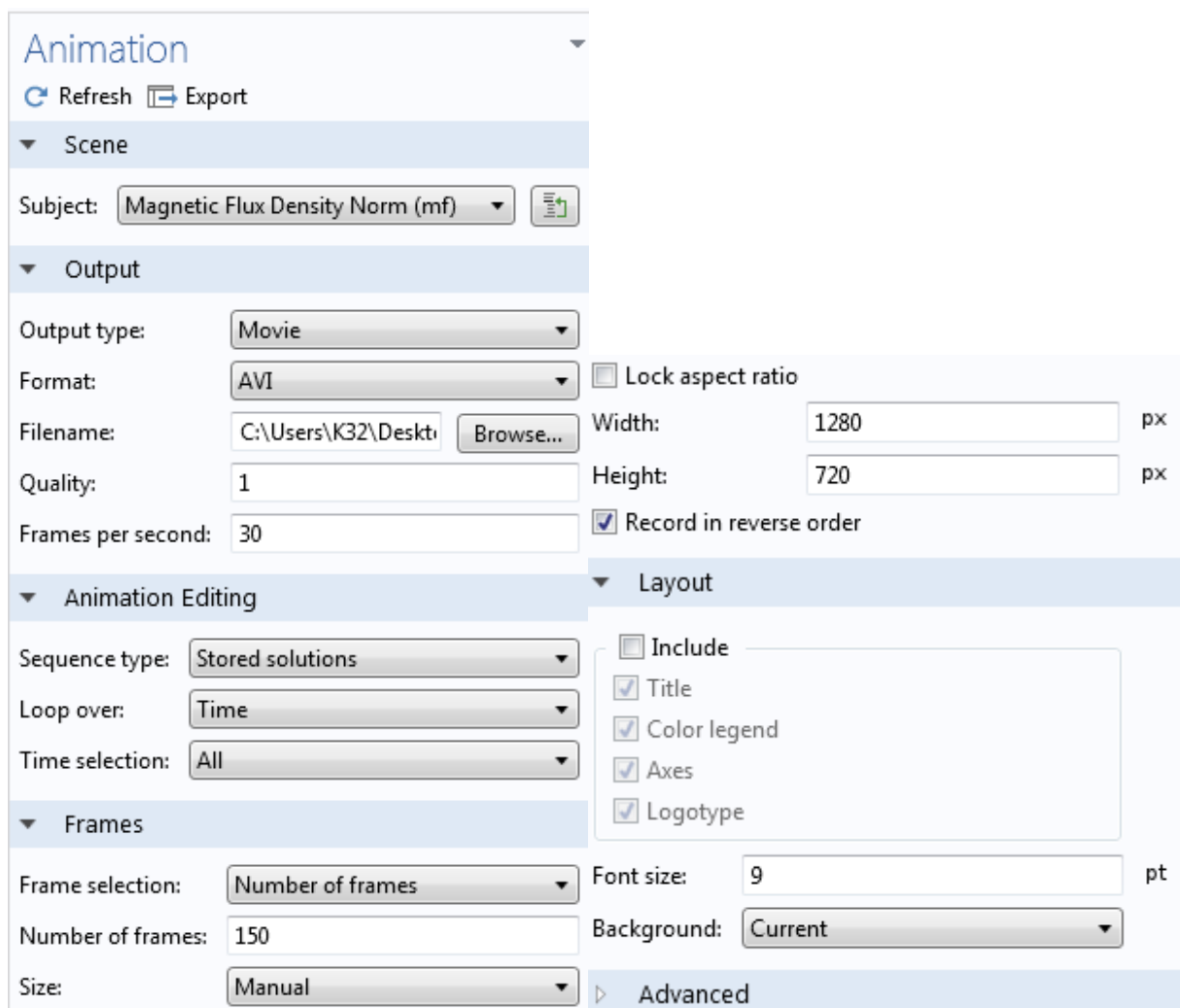


Рис.60 – Параметри вкладки **Animation**

Натиснути «**Export**» для отримання результату у вигляді відео.

15. Щоб додати в результати відображення струмів (**Current density, z component(mf.Jz)**) потрібно:

Скопіювати вкладку **Magnetic Flux Density Norm** натиснувши вкладку **Duplicate**:

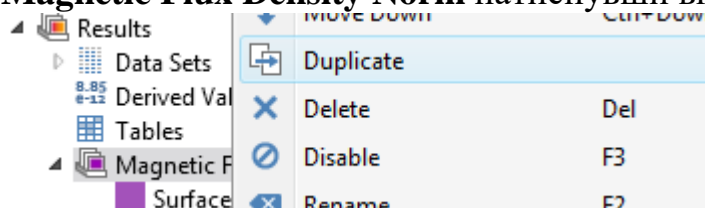


Рис.61 – Дублювання вкладки **Current density, z component (mf.Jz)**

У вікні **Surface** справа **Expression** додати **Current density, z component(mf.Jz)**:

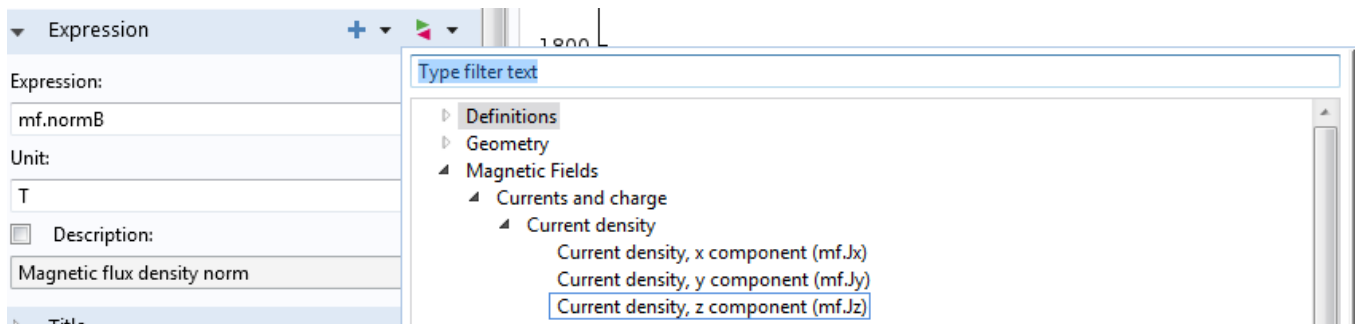


Рис.62 – Задання формули **Current density, z component (mf.Jz)**

16. Щоб додати в результати відображення розподілу ліній векторного магнітного потенціалу необхідно:

Скопіювати вкладку **Current density, z component** нажавши **Duplicate**:

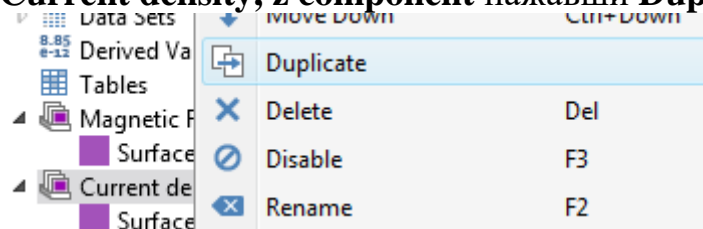


Рис.63 – Дублювання вкладки **Current density, z component (mf.Jz)**

Натиснувши **Magnetic flux density** вибрати **Contour**:

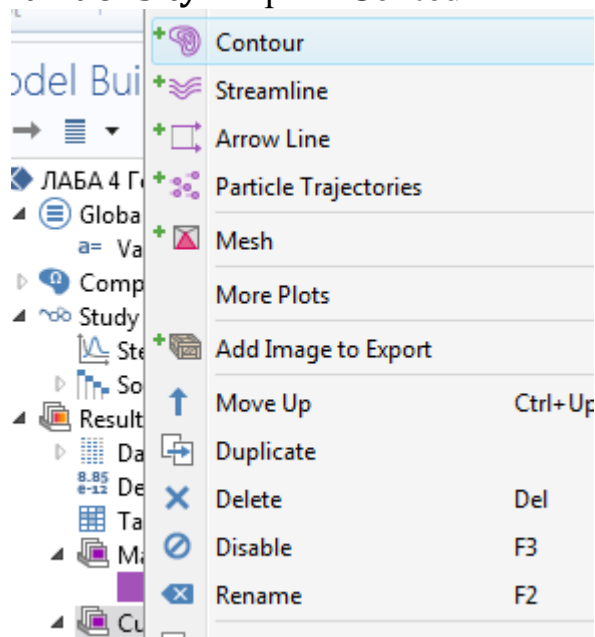


Рис.64 – Додавання вкладки **Contour**

Settings

Contour

Plot

Label:

Data

Data set:

Expression

Expression:

Unit:

☐ Description:

Title

Levels

Entry method:

Total levels:

Coloring and Style

Contour type:

☐ Level labels

Coloring:

Color table:

☒ Color legend

Рис.65 – Задання параметрів у вкладці **Contour**

У вікні **Contour** справа натиснути **Expression** і додати **Magnetic vector potential, z component (Az)**:

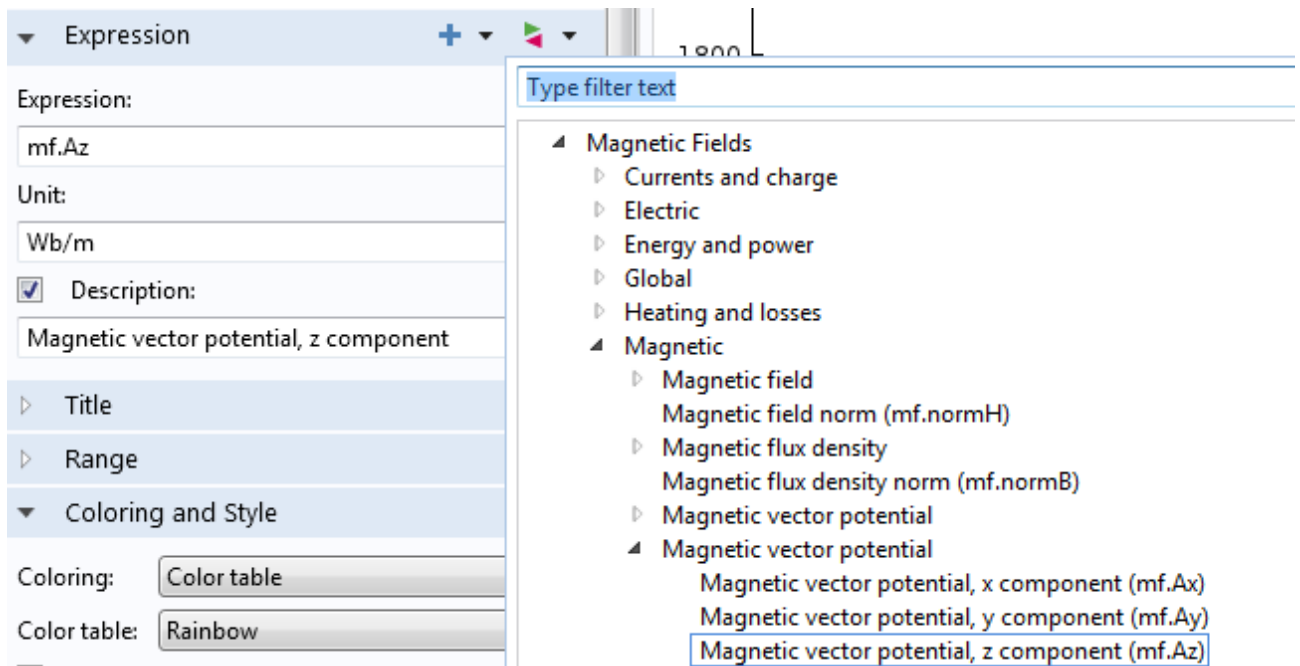


Рис.66 – Задання формули **Magnetic vector potential, z component (Az)**

Змінити назву **Magnetic flux density** на **Magnetic vector potential, z component** поставивши галочку в **Description**.

17. Для розрахунку моделі натиснути На панелі інструментів **Compute**



Вивід результатів робиться аналогічно до алгоритму процесу моделювання трифазного трансформатора.

Необхідно створити 3 відеоролики:

- 1) зміна в часі розподілу в розрахунковій області магнітної індукції **mf.normB** і контурів **Az**;
- 2) зміна в часі розподілу в розрахунковій області струмів в обмотках **mf.Jz** і контурів **Az**;
- 3) зміна в часі розподілу в розрахунковій області векторного магнітного потенціалу **Az** і контурів **Az**;

18. Якщо після розрахунку не відображаються струми в роторі або статорі АД, а максимальні значення струмів на шкалі рисунку мають величини порядку 10^{10} , причому струми в статорі задавалися з порядком 10^6 , то необхідно змінювати діапазон величин струмів, що відображаються на екрані, змінюючи порядок відображення струмів на приблизно $10^6 \dots 10^7$ в параметрі **Range**.

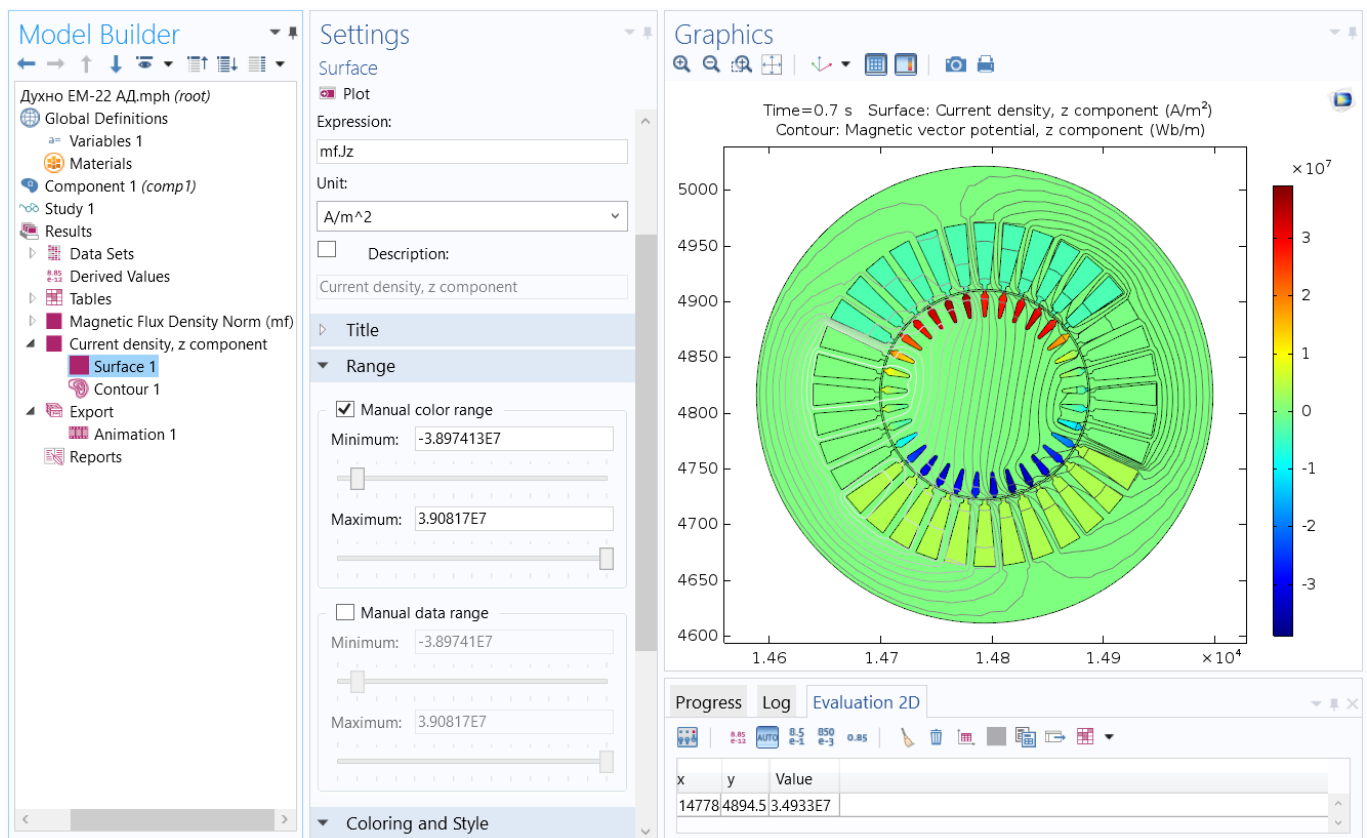


Рис.67 – Задання струмів в параметрі **Range**

19. Побудова графіка розподілу нормальної складової тензора магнітно-го натягу вздовж довжини повітряного проміжку.

Для подальшого аналізу віброзбуджуючих сил в АД необхідно знайти розподіл нормальної складової тензора магнітного натягу вздовж повітряного проміжку.

Для цього після розрахунку моделі необхідно:

1) В дереві **Model Builder** → **Component 1** (Component 1 (comp1)) → **Definitions** → **Explicit 1** (Explicit 1) вибрати **Boundary** і виділити всі криволінійні відрізки на лінії, що проходить по середині повітряного проміжку, або на поверхні статора, або на поверхні ротора.

2) В дереві **Model Builder** → **Component 1** (Component 1 (comp1)) → **Results** → **1D Plot Group** → **Line Graph** (Line Graph) додати.

3) В параметрах **Line Graph** (Рис. 69) в налаштуваннях **Data Select** обрати **From parent**, в **Selection** обрати **Explicit 1**. В параметрах **y-Axis Data** в полі **Expression** вписати вираз для нормальної складової вектора тензора магнітного натягу:

$$(y*mf.dnTy+x*mf.dnTx)/R_{rot}$$

Взагалі необхідно створити такі графіки розподілу параметрів на поверхні розтки статора в програмі Comsol Multiphysics:

1. нормальної складової вектора тензора магнітного натягу
 $(y*mf.dnTy+x*mf.dnTx)/R$, де R - радіус ротора.
2. тангенціальної складової вектора тензора магнітного натягу
 $(y*mf.dnTx-x*mf.dnTy)/R$, де R - радіус ротора.
3. нормальної складової вектора магнітної індукції
 $(y*mf.By+x*mf.Bx)/R$
4. тангенціальної складової вектора магнітної індукції
 $(y*mf.Bx-x*mf.By)/R$

Взагалі в **Comsol Multiphysics** можна вирішувати гармонічну задачу **Stationary** (коли струми в провідниках статора і ротора є гармонічними функціями і результати розрахунків є такими, що відображені в певний момент часу) і часозалежну задачу **Time-Dependent**. У 2-му варіанті при побудові графіків необхідно вибрати конкретний момент часу: **Time Selection**→**From list** (Рис. 68).

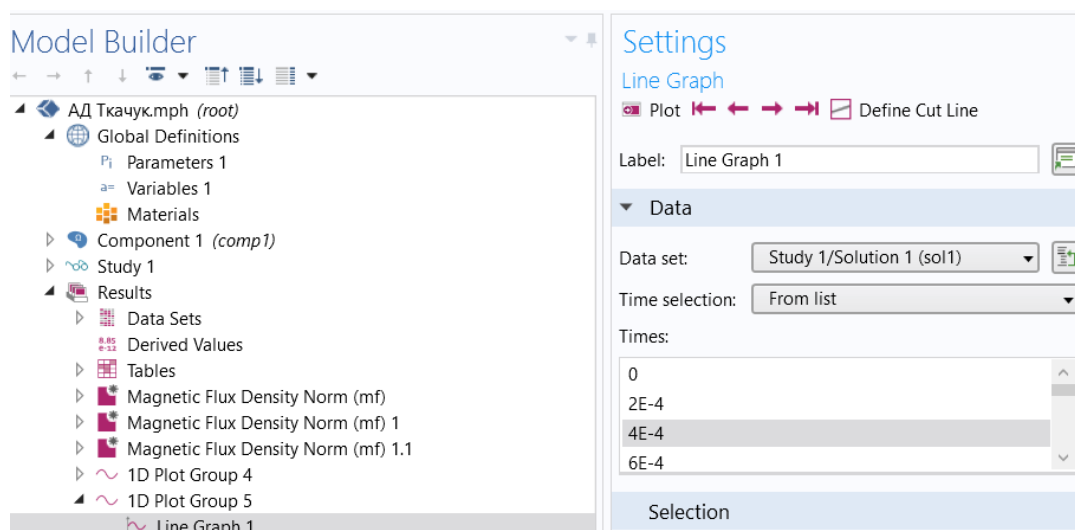


Рис. 68 - Параметри **LineGraph**

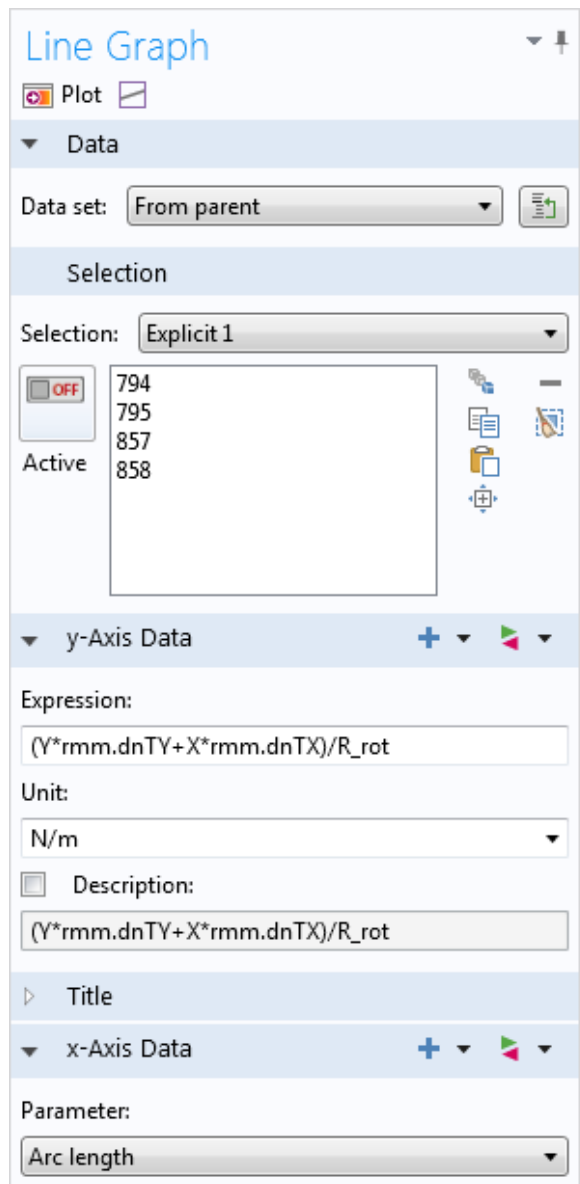


Рис. 69 - Параметри **LineGraph**

4) В параметрах **x-Axis Data** обрати **Arc Length**. Натиснути кнопку **Plot**, після чого почнеться побудова графіка тензору магнітного натягу (Рис. 5.32, 5.33).

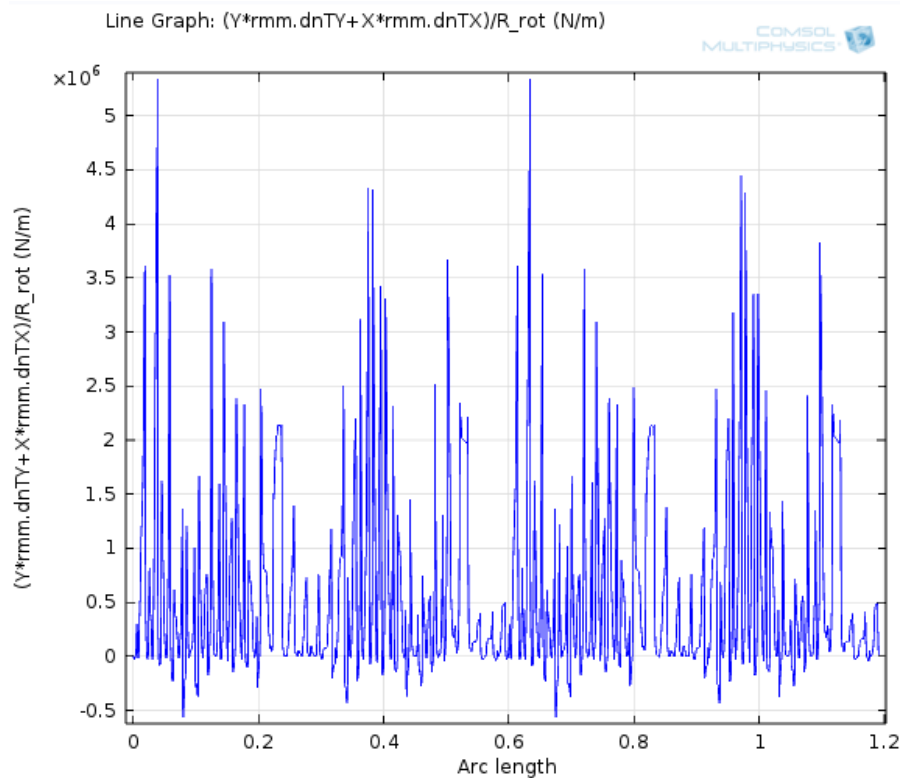


Рис. 70 - Розподіл тензора магнітного натягу в неушкодженому АД

20. Критерії правильності виконання лабораторної роботи:

- 1) Силкові лінії магнітного поля відповідають полюсності АД.
- 2) Максимальні значення індукції в межах 2-2.5 Тл (може відрізнитися залежно від варіанта, але не більше 3 Тл). Адекватні значення індукції (як у всіх електричних машинах: $B_\delta=0,8$ Тл, $B_z=2,3$ Тл);
- 3) Струми в роторі розповсюджені по поперечному перерізу паза ротора рівномірно.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
2. Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії: навч. посіб. / Ю.М. Васьковський. – К.: НТУУ “КПІ”, 2003. – 161 с.
3. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: навч. посіб. / Ю.М. Васьковський. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 192 с.
4. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
5. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. – М.: Госэнергоиздат, 1950. – 551 с.
6. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. – Л.: Изд. АН СССР, 1962. – 626 с.
7. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
8. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
9. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учеб. пособ. / [О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская] ; под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Высш. школа, 2001. – 512 с.
10. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин: учеб. – [2-е изд.] / И.М. Постников. – М.: Высш. школа, 1975. – 319 с.
11. Сенигов П.Н. Переходные процессы в синхронных машинах: учеб. пособ. / П.Н. Сенигов. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – 44 с.

ДОДАТОК

Перелік інформації, що необхідно представити в протоколах:

1. До Комп'ютерного практикуму №1:

1. Мета роботи, програма роботи;
2. Дані згідно варіанту;
3. Скрін програми з даними згідно варіанту;
4. Рисунок з розрахунком 4-х графіків для номінальних даних в координатах α, β – 1 шт;
5. Рисунок з розрахунком 4-х графіків для номінальних даних в координатах u, v – 1 шт;
6. Таблички з підписами – 7 штук;
7. Графіки в Excel – 7 штук;
8. Висновки.

2. До Комп'ютерного практикуму №2:

1. Мета роботи, програма роботи;
2. Схема в Simulink;
3. Рисунки з параметрів (властивостей) блоків в схемі у відповідності з варіантом;
4. Рисунки зі Score – 4 штуки:
 - струмів фаз обмотки статора I_1 ;
 - струмів фаз обмотки ротора I_2 ;
 - електромагнітний момент M ;
 - швидкість обертання ротора n ;
 - напруга мережі U .
5. Для кожного з коефіцієнтів (k_A, k_ϕ, k_z) необхідно навести: формула, таблиця ($I_{y\phi}^*, M_{y\phi}^*$ і t_P), графік в Excel. Все це підписати.
6. Висновки.

3. До Комп'ютерного практикуму №3:

1. Мета роботи, програма роботи;
2. Дані згідно варіанту;
3. Схема в Simulink;
4. Графіки з підписами – 8 штук ($I_1, M_{em}, \theta, U_a, i_e, U_e, n, \dots$);
5. Таблички з підписами – 2 штук (x_d, x_d'');
6. Графіки в Excel – 2 штуки (x_d, x_d'');
7. Висновки.

4. До **Комп'ютерного практикуму №4:**

1. Мета роботи, програма роботи;
2. Дані згідно варіанту;
3. Схема в Simulink;
4. Таблички з підписами – 8 штук ($I_1, M_{ем}, \theta, U_a, i_{\phi}, U_{\phi}, n, \dots$);
5. Графіки в Excel – 8 штук ($I_1, M_{ем}, \theta, U_a, i_{\phi}, U_{\phi}, n, \dots$);
6. Табличка з підписами – 1 штука ($\varphi_{мережі}$);
7. Графік в Excel – 1 штука ($\varphi_{мережі}$);
8. Висновки.

5. До **Комп'ютерних практикумів №5, 6:**

1. Мета роботи, програма роботи;
2. Дані трансформатора;
3. Скрін трансформатора в програмі Comsol Multiphysics (можна ч/б):
 - а. Розподіл індукції і ізоляцій магнітного поля;
 - б. Розподіл струмів в обмотках і ізоляцій магнітного поля.
 - с. Розподіл векторного магнітного потенціалу.
4. Дані асинхронного двигуна;
5. Скрін асинхронного двигуна в програмі Comsol Multiphysics (можна ч/б):
 - а. Розподіл індукції і ізоляцій магнітного поля;
 - б. Розподіл струмів в обмотках і ізоляцій магнітного поля.
 - с. Розподіл векторного магнітного потенціалу.
6. В протоколі повинні бути побудовані графіки розподілу параметрів: магнітної індукції і нормальної складової тензора магнітного натягу.
7. Протокол до комп'ютерного практикуму повинен бути виконаний у відповідності до критеріїв правильності виконання комп'ютерних практикумів №5, 6.
8. Висновки.

Критерії правильності виконання комп'ютерних практикумів №5, 6:

1. Вимоги до файлу **Comsol Multiphysics**:
 - а. Індукція - адекватні значення (як у всіх електричних машинах)
 - б. Розміри магнітопровода - адекватні значення
 - с. ширина зубців статора і ротора повинна бути однаковою
 - д. Модель АД повинна бути центрована в центрі координат! (зміщуйте або в Автокад або в Comsol (що незручно).
 - е. Додати рівняння з розшифровкою його складових:

Equation

Equation form:

Time dependent

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

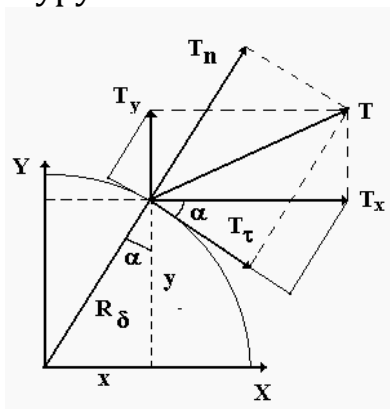
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

f. Створити графіки розподілу параметрів на поверхні розточки статора (або на лінії в повітряному зазорі, додатково доданої або в Автокад або в Comsol):

1. нормальної складової вектора тензора магнітного натягу
 $(y \cdot \text{mf.dnTy} + x \cdot \text{mf.dnTx}) / R$, де R - радіус ротора.
2. тангенціальної складової вектора тензора магнітного натягу
 $(y \cdot \text{mf.dnTx} - x \cdot \text{mf.dnTy}) / R$, де R - радіус ротора.
3. нормальної складової вектора магнітної індукції
 $(y \cdot \text{mf.By} + x \cdot \text{mf.Bx}) / R$
4. тангенціальної складової вектора магнітної індукції
 $(y \cdot \text{mf.Bx} - x \cdot \text{mf.By}) / R$

е. Додати до звіту з комп'ютерного практикуму рис. з посиланням на літературу:



Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії. – К.: НТУУ “КПІ”, 2003. – 164 с.

2. Показати графіки розподілу магнітної індукції, щільності струмів, векторного магнітного потенціалу:

а. **в трансформаторі**: по горизонтальній лінії по середині трансформатора для одного моменту часу.

б. **в асинхронному двигуні** на 3-х лініях: на поверхні ротора, на лінії проведеної по середині повітряного зазору, на поверхні розточки статора.

с. в асинхронному двигуні порівняти ці лінії на 1 малюнку для кожного типу параметра: магнітної індукції, щільності струмів, векторного магнітного потенціалу.

3. Показати розподіл магнітної індукції:

а. Правильно перейменувати вкладку "розподіл магнітної індукції"

б. Показати контуром векторний магнітний потенціал.

с. Колір контуру – зручний для сприйняття.

д. Показати точки з максимальним і мінімальним значенням магнітної індукції в зручному для сприйняття кольорі.

4. Показати розподіл щільності струмів:

а. Правильно перейменувати вкладку "розподіл щільності струмів"

б. Показати контуром векторний магнітний потенціал.

с. Колір контуру - зручний для сприйняття.

д. Показати точки з максимальним і мінімальним значенням щільності струмів в зручному для сприйняття кольорі.

5. Показати розподіл векторного магнітного потенціалу:

а. Правильно перейменувати вкладку "розподіл векторного магнітного потенціалу"

б. Показати точки з максимальним і мінімальним значенням векторного магнітного потенціалу в зручному для сприйняття кольорі.

6. Вимоги до відео:

а. Відео - зручне для сприйняття:

1. кількість кадрів в секунду,

2. тривалість відео.

б. 1 відео з демонстрацією зміни розподілу магнітної індукції (наявність контуру за бажанням)

с. 1 відео з демонстрацією зміни розподілу щільності струмів (наявність контуру за бажанням)

д. В АД магнітний потік обертається

7. Експортувати будь-який графік в Excel. У протоколі відобразити малюнок цього графіка в Excel.

8. Також в протоколі можна використовувати малюнки зі звіту, який можна створити в Comsol в автоматичному режимі.

9. Необхідно знати які і як параметри Comsol задаються.

10. В висновках пояснити як змінюється магнітне поле і тензор магнітного натягу в АД при ушкодженні стержнів ротора.